Альфред Хендель

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
[illegible]

GRUNDGESETZE DER PHYSIK

von DR. ALFRED HAENDEL

Dritte, verbesserte und ergänzte Auflage

FACHBUCHVERLAG LEIPZIG 1955

АЛЬФРЕД ХЕНДЕЛЬ

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ

Перевод с третьего немецкого издания
И. Ф. ГОЛОВИНОЙ

Под редакцией проф. Н. Н. МАЛОВА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1958

13-3-5

АННОТАЦИЯ

В книге доступно и сжато изложены основные сведения из всех областей элементарной физики: механики, акустики, молекулярной физики, оптики, электричества и атомной физики. По характеру изложения книга может служить справочником по элементарной физике. Рассчитана на широкие круги читателей: учащихся средних школ и техникумов; пригодна для самообразования.

Альфред Хендель.
Основные законы физики.

Редактор *Е. Б. Кузнецова.*
Техн. редактор *А. П. Колесникова.* Корректор *Л. И. Савочкина.*

Сдано в набор 25/X 1957 г. Подписано в печать 27/III 1958 г. Формат бумаги $84 \times 108^1/_{32}$. Физ. печ. л. 8,87. Условн. печ. л. 14,55. Уч.-изд. л. 13,64. Тираж 75 000 экз. Т-02292. Цена 5 руб. 10 коп. Заказ № 947.

Государственное издательство физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ленинградский Совет народного хозяйства. Управление полиграфической промышленности.
Типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького.
Ленинград, Гатчинская, 26.

СОДЕРЖАНИЕ

V. Электричество и магнетизм

VI. Излучение и вещество

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Успех, который имела в Германии предлагаемая вниманию читателя книга А. Хенделя, позволяет думать, что она представит интерес и для советского читателя.

Хотя в отдельных местах изложение материала несколько старомодно и не соответствует принятому в советской школе (использование «магнитных масс», нестрогое определение теплоты и др.), все же оказалось возможным при редактировании перевода в основном сохранить авторский текст.

Однако, помимо исправления отдельных случайных оговорок и опечаток, кое-где текст пришлось переработать более значительно, так как он опирался на устарелый материал (например: понятие тепла (III. 4-а), работа и теплота (III. 6), дифракция от проволоки и от щели (IV. Б. 2-а и IV. Б. 2-б), распространение радиоволн (V. Г. 4-г), космическое излучение (VI. А. 1-г), свойства фотонов (VI. А. 2-в), атомная модель Бора (VI. Б. 3-в), волны вещества (VI. Б. 4).

Кроме того, были исключены отдельные случайные примеры введения рационализированной системы единиц, так как советские школьники, к сожалению, с этой системой не знакомятся.

Для единицы силы вместо «килограмма» сохранен используемый автором «килопонд», что устраняет путаницу в единицах силы и массы; следует пожелать, чтобы это наименование скорее проникло в нашу учебную литературу.

Табличный материал был проверен по последним данным и соответствующим образом исправлен. За весьма редкими исключениями (исправление прямых ошибок) сохранен весь иллюстративный материал немецкого издания.

Москва, январь 1957 г. *Н. Малов*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика сегодняшнего дня — это техника завтрашнего дня! Мы, люди XX века, живем в эпоху бурно развивающейся техники. Каждому, соприкасающемуся с техникой, необходимо основательное знакомство с важнейшими сведениями физики, это является основной предпосылкой для понимания технических процессов.

Книга «Основы физики» представляет попытки в доступной сжатой форме дать обзор всех областей физики.

Книга предназначена в первую очередь для юных техников, желающих освежить и углубить свои познания в области физики перед началом учения в высшей или специальной школе. Отдельные разделы составлены таким образом, чтобы облегчить понимание и запоминание трудных вопросов. Поэтому книга может оказаться полезной также каждому читателю, желающему быстро ориентироваться в вопросах физики.

Быстрота, с которой разошлись первые издания, показывает, что книга соответствует поставленной цели. Треть издание было переработано и дополнено.

Лейпциг, весна 1955 г. *АВТОР И ИЗДАТЕЛЬСТВО*

ВВЕДЕНИЕ

1. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ФИЗИКИ

Слово физика происходит от греческого слова (физис — природа) и первоначально обозначало естествознание (в широком смысле). С ростом наших познаний о явлениях природы возникла необходимость в разделении областей исследований. Ныне физика охватывает только исследование мертвой природы с тем ограничением, что рассматриваются лишь такие изменения состояния тел, при которых состав вещества остается без изменения; в крайнем случае, может изменяться их агрегатное состояние (твердое, жидкое, газообразное). Исследование изменений состава вещества является задачей химии. Эти смежные области знания частично переплетаются; в новой атомной физике границы между ними совершенно стираются.

Новая физика начинается с *Галилея* (1564—1642), который первый ввел эксперимент как метод установления закономерных связей. При этом в основу физических исследований были положены мера и число.

Метод Галилея заключается в использовании сознательно видоизменяемых опытов и полученных из них серий измерений для установления обобщающих закономерностей. Этот путь от частного к общему называется *индуктивным методом*; он широко применяется в экспериментальной физике. Индуктивному методу противопоставляется *дедуктивный метод*. Предполагаемая причинная связь между различными физическими явлениями принимается как закон (гипотеза), и из нее выводятся соответствующие следствия для отдельных частных случаев. Если эти следствия подтверждаются экспериментом во всех без исключения случаях, то гипотеза превращается в теорию. Дедуктивный путь господствует в теоретической физике. Оба пути равноправны и применяются параллельно в физических исследованиях.

2. ИЗМЕРЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Физические законы устанавливаются посредством измерений. Каждая физическая величина поэтому приводится к основным единицам измерения. Подробно эти единицы рассматриваются в соответствующих разделах книги. Нижеследующее сопоставление имеет целью дать лишь первоначальные сведения.

а) Меры длины

Первоначально метр должен был быть воспроизводимой — естественной мерой — $\frac{1}{10\,000\,000}$ частью четверти земного меридиана (дуга меридиана полюс — экватор). Последующие успехи измерительной техники показали, что эта цель не была полностью достигнута. Сохраняющийся в Париже эталон оказался, на основании произведенных современными методами измерений, $\frac{1}{10\,000\,850}$ частью четверти земного меридиана, приведенного к уровню моря, т. е. почти на $\frac{1}{10}$ *мм* меньше, чем предполагалось вначале. Так как каждое последующее измерение давало бы опять хотя бы небольшие поправки, то большинство стран согласилось считать *парижский прототип эталоном метра.*

1 *м* = 10 *дм*, 1 *дм* = 10 *см*, 1 *см* = 10 *мм* (переводной множитель 10), 1 *км* = 1000 *м*.

Единицей длины в физической системе измерений служит *см*, более мелкими являются

1 *мм* = 10^{-1} *см* = 10^{-3} *м*,

1 микрон (μ) = 10^{-3} *мм* = 10^{-4} *см* = 10^{-6} *м*,

1 миллимикрон (*м*μ) = 10^{-3} μ = 10^{-7} *см* = 10^{-9} *м*,

1 ангстрём [1] (Å) = 10^{-1} *м*μ = 10^{-8} *см* = 10^{-10} *м*,

1 пикометр (*пм*) = 10^{-3} *м*μ = 10^{-10} *см* = 10^{-12} *м*.

Точность измерений может все более повышаться путем применения прецизионных приборов. Американский физик Майкельсон (1852—1931) измерил в 1895 г. длину метра-эталона в длинах волн красной спектральной линии кадмия: 1 *м* = 1 553 164 $\lambda_{\text{кр Cd}}$.

[1] Название по фамилии шведского физика *Ангстрёма* (1814—1874), работавшего главным образом в области спектрального анализа.

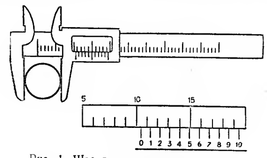
(1) 10 делений нониуса ≑ 9 дел. главной шкалы = $\frac{9}{10}$ часть 10 дел. гл. шк.
(2) отношение между 10 дел. нон. и гл. шк. есть 9:10 (иногда 11:10)

В практических измерениях очень важно выявлять все источники возможных ошибок измерений. Они могут быть субъективными ошибками наблюдателя, но могут происходить также из-за несовершенства использованных масштабов.

Абсолютной ошибкой масштаба называется отклонение некоторой длины масштаба от соответствующей длины эталона. Относительной ошибкой считают отношение абсолютной ошибки к общей — измеренной длине. Для оценки точности какого-либо результата измерений часто пользуются средней ошибкой серии измерений. Она равна среднему арифметическому отклонений отдельных измерений от среднего значения измеряемой величины (среднего арифметического всех произведенных отсчетов).

б) Измерение длины

Для грубых измерений длины служат масштабы и рулетки; для более точных измерений — раздвижной штангенциркуль с нониусом (рис. 1) и микрометр. *Нониус* пред-



ср. с. 20

Рис. 1. Штангенциркуль с нониусом.

ставляет собой неподвижный масштаб с миллиметровыми делениями, по которому скользит вспомогательная линейка (движок) с делениями; последние часто наносятся так, что девяти делениям неподвижной шкалы соответствуют 10 делений движка, так что каждое деление нониуса оказывается на 0,1 *мм* короче каждого деления масштаба. При сдвинутых ножках штангенциркуля нули на обеих шкалах совпадают.

(3) разность между 10 дел. нон. и гл. шк. { = 1 дел. гл. шк. / содержится 10 раз в 10 дел. гл. шк. / = $\frac{1}{10}$ часть 10 дел. гл. шк.

(4) 10 дел. нон. короче (иногда длинней) 10 дел. гл. шк. на { 1 дел. гл. шк. / $\frac{1}{10}$ часть 10 дел. гл. шк.

Следоват: одно дел. нон. ≑ $\frac{9}{10}$ часть дел. гл. шк. т.е. → (стр 18)

На рисунке изображено измерение диаметра стержня. Четвертая черточка нониуса совпадает с одной из черточек неподвижного масштаба. Третья черточка нониуса стоит на 0,1 *мм* правее соответствующей черточки неподвижного масштаба, вторая — на 0,2 *мм*, первая — на 0,3 *мм*; следовательно, начало шкалы нониуса смещено на 0,4 *мм* вправо от черточки неподвижного масштаба, соответствующей 10 *мм*. Следовательно, измеренный диаметр равен 10,4 *мм*.

Микрометр (рис. 2) дает возможность отсчета сотых долей миллиметра. При полном обороте микрометрического винта последний смещается поступательно на одно деление (ход винта равен обычно 1 *мм*). Конец винта закреплен в полом цилиндре (барабане), поверхность которого разде-

Рис. 2. Микрометр.

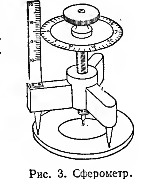


Рис. 3. Сферометр.

лена на 100 равных делений. Когда край барабана совпадает с одним из миллиметровых делений главной шкалы, нулевое деление барабана совпадает с постоянной отметкой винта (горизонтальной линией неподвижной шкалы). Если толщина стержня, например, 6,35 *мм*, то шесть делений главной шкалы открыты, а у постоянной отметки стоит 35-е деление шкалы барабана.

Сферометр (рис. 3) служит для измерений толщин, например, кристаллов и оптических линз. Столик на трех ножках снабжен вертикальным винтом и стоит на стеклянной пластинке; гайка винта закреплена в столике. Диск головки винта разделен по окружности на 100 делений. Край диска плотно прилегает к неподвижному вертикальному масштабу с миллиметровыми делениями. Отсчет производится так же, как на микрометре. В технике для измерений длин до 25 *мм* часто применяются *измерительные часы*.

т.е. короче на 1/10 часть дел. гл. шк.
ср. с. 20 вн.; с. 21 л.б

Из кожуха измерительных часов торчит пружинящий штифт, на его верхней части нарезана зубчатая рейка; она сцепляется с зубчатой колесной передачей, превращающей смещение штифта во вращательное движение указателя. Точность измерения достигает 1/1000 *мм*.

Более точные измерительные приборы мы будем рассматривать в оптике.

в) Меры площадей

1 *км*² = 100 *га*, 1 *га* = 100 *а*, 1*а* = 100 *м*²;
1 *м*² = 100 *дм*², 1 *дм*² = 100 *см*², 1 *см*² = 100 *мм*² (переводным коэффициентом служит 100).

г) Измерение площадей

Измерение плоских поверхностей, ограниченных прямыми линиями, сводится, на основании геометрических правил, к измерению длины сторон прямоугольников и треугольников. Измерение площадей, ограниченных кривыми, сложнее; оно осуществляется интегрированием, которое может быть выполнено механически (планиметром)[1]. Иногда целесообразно применить физический метод: измерение площади посредством взвешивания. При этом измеряемая поверхность чертится на картоне постоянной толщины, вырезается и взвешивается. Отношение веса всей фигуры из картона к весу куска единичной площади дает величину измеряемой площади.

д) Меры объема

1 *м*³ = 1000 *дм*³ (литрам), 1 *дм*³ = 1000 *см*³;
1 *см*³ = 1000 *мм*³ (переводной коэффициент 1000).

е) Измерение объема

Измерение объема тел, ограниченных плоскостями, сводится к измерению длин. Для измерения объема тел неправильной формы применяется *отливной стакан* (рис. 4). Этот

[1]) Для понимания работы планиметра нужно знать интегральное исчисление.

способ определения объема основывается на принципе непроницаемости: там, где находится тело, не может одновременно находиться жидкость. Вытекающая избыточная жидкость сливается в мерный цилиндр. Измерение объема может быть выполнено при помощи взвешивания при условии, что известен вес единицы объема, т. е. удельный вес.

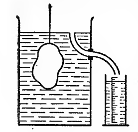


Рис. 4. Отливной стакан.

ж) Измерение углов

При измерении углов до сих пор пользуются древним делением окружности на 360 градусов (еще со времен вавилонян). Единицей служит один градус. $1° = 60$ минутам($'$), $1' = 60$ секундам ($''$). Для измерения углов на местности применяют теодолит (рис. 5). Он состоит из зрительной трубы, которая может вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Отсчеты углов производятся соответственно на горизонтальном и вертикальном кругах. Установка зрительной трубы на какую-либо точку дает, таким образом, два угла: горизонтальный угол (азимут), отмеренный от точки севера или юга, и вертикальный угол (высота = углу подъема над плоскостью горизонта). На этом

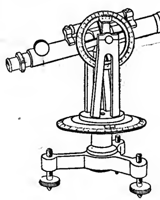


Рис. 5. Теодолит.



Рис. 6. Угловой нониус.

приборе также применяется нониус (рис. 6). Если 29 делениям круга соответствуют 30 делений нониуса, то каждое деление нониуса короче на $1/30° = 2'$. Например,

{ 1/30 часть деления круга, т.е. 2'

30 дел. нон. короче 30 дел. круга на { 1 дел. круга / 1/30 часть 30 дел. круга

∴ и т.д.

если при отсчете 3-е деление нониуса совпадает с делением главной шкалы, то к целому числу градусов на круге надо прибавить $3 \cdot 2' = 6'$. На рис. 6 на шкале нониуса перерасчет уже принят во внимание. На новых измерительных приборах круг разделен на 400 частей (новые градусы), следовательно, прямой угол равен 100 градусам. Для дальнейших подразделений применяется десятичная система. *

з) Измерение времени

Основной единицей времени является *секунда (сек)*. Одна секунда равна 1/86400 части средних солнечных суток. Время одного оборота Земли вокруг оси называется сутками. При этом нужно различать промежутки времени между двумя последовательными кульминациями [1]) одной и той же звезды — этот интервал называется звездными сутками, между двумя последовательными кульминациями Солнца — солнечными сутками.

Продолжительность «истинных солнечных суток» изменяется вследствие непостоянства скорости движения Земли вокруг Солнца. Поэтому за единицу времени принимаются «средние солнечные сутки», среднее значение истинных солнечных суток за год. Средние солнечные сутки делятся на 24 часа, час — на 60 минут, минута — на 60 секунд.

1 средние солнечные сутки	= 86 400 *сек* (сред. солн. вр.)
1 звездные сутки	= 86 164 *сек* (сред. солн. вр.).

Вместо того чтобы сравнивать измеряемые промежутки времени со временем движения Солнца, на практике применяют другие периодически повторяющиеся процессы, например вытекание определенного количества песка или воды (песочные часы, водяные часы) или качание маятника (маятниковые часы). В часах применяются также закономерные колебания технического переменного тока. Наибольшим постоянством обладают колебания кристалла кварца под воздействием электрического переменного напряжения (кварцевые часы).

[1]) Кульминацией называют прохождение светила через меридиан места. Кульминация Солнца соответствует его наивысшему положению в данный день.

* т.е, 10 нов. гр. { ≙ 9 стар. гр. = $\frac{9}{10}$ часть 10 стар. гр.
{ короче 10 стар. гр. на { 1 дел. = 1 стар. гр.
{ $\frac{1}{10}$ часть 10 стар. гр.

ср. Рис. 1

и) Измерение силы

Наше представление о силе появилось от мускульной силы. Чтобы сместить пустую ручную тележку, мы применяем меньшую силу, чем для смещения нагруженной тележки. Для того чтобы объективно измерить силы, мы применяем пружинные весы (рис. 7). Динамометр, или силомер, состоит из винтовой пружины или изогнутой листовой пружины, которая при воздействии растягивающей силы растягивается, а при воздействии давящей силы — сжимается (рис. 8 и 9). Растяжение или сжатие в известных грани-

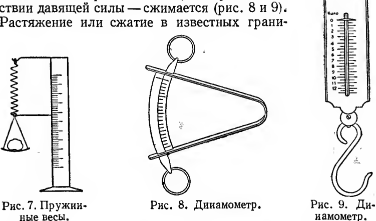


Рис. 7. Пружинные весы. Рис. 8. Динамометр. Рис. 9. Динамометр.

цах (предел упругости, стр. 38) пропорционально действующей силе.

За единицу силы была принята сила, необходимая для удержания в равновесии одного литра воды при 4° С на уровне моря и широте 45°. Эта сила называется килопондом (*кп*), одна тысячная доля килопонда называется 1 пондом (*п*) [1].

Силы измеряются в килопондах (*кп*) и пондах (*п*).

[1]) Пондус по-латински обозначает вес, тяжесть. Обозначения килопонд и понд мы ввели, чтобы избежать путаницы единицы силы с единицей массы — килограммом. В технике и жизни эти обозначения еще не привились.

с.46 килопонд ≡ килограмм-сила

На шкалах наших динамометров обычно обозначены килограммы (*кг*) и граммы (*г*), которые в физике используются для обозначения совершенно другой величины — массы, о существовании которой мы впервые узнаем в динамике. Судить о силе мы можем только по ее действию. Последнее обусловливает изменение движения тела или его формы (деформация). У пружинных весов деформация пропорциональна силе; эту деформацию мы используем для измерения силы.

Сила, под действием которой находятся все тела на Земле, называется силой тяжести, она проявляется в весе тела. Сила тяжести не везде одинакова, она зависит от расстояния тела от центра Земли. Одно и то же тело растягивает пружину динамометра в Мюнхене сильнее, чем на Монблане. На Северном полюсе вес одного литра воды (при прочих равных условиях) больше, чем на экваторе, так как Северный полюс вследствие сплюснутости Земли находится ближе к центру Земли, чем экватор. Но эта разница в весе меньше, чем 0,5%, и может в повседневной жизни не приниматься в расчет. Физик же не должен об этом забывать.

Вес тела зависит от места измерения.

Силы отличаются еще одним свойством от величин, которые мы до сих пор измеряли. Для определения силы мало измерить ее величину (ее численное значение), но нужно знать также направление ее действия, а также и точку ее приложения. Например, длина полностью определяется ее численным значением. Этого рода величины называют *скалярами* [1]).

Направленные величины, как, например, сила, называют *векторами* [2]).

Вектор изображается графически стрелкой; он определяется тремя величинами: точкой приложения, направлением, численным значением.

При графическом изображении необходимо задать масштаб; 1 *см* может обозначать 1 *п*, а также и 1 *кп*, или 10 *кп*.

[1]) Скале (лат.) — лестница, стремянка.

[2]) Вехере (лат.) — вести; вектор — подвижной луч.

I. МЕХАНИКА

А. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

1. СТАТИКА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

а) Основные законы равновесия

Тело называется твердым, если оно под действием внешних сил не изменяет своей формы. «Твердое» тело — абстракция, означающая, что внутренними изменениями тела можно пренебречь. В твердом теле можно произвольно переносить точку приложения какой-либо силы по линии действия последней. Направлением действия силы считают линию, проходящую через точку приложения силы и совпадающую с направлением силы. Две противоположно направленные равные силы уравновешиваются (взаимно уничтожаются), тело остается в равновесии. Статика занимается рассмотрением условий, при которых тело под действием сил остается в равновесии [1]). Всякая действующая на тело сила приводит его в движение или вызывает в нем равную и противоположную по направлению силу противодействия (рис. 10).

Рис. 10. Действующая и противодействующая силы.

| Действие = противодействию. |

Этот закон сформулирован *Ньютоном* [2]) в 1670 г. Действие системы сил не изменяется, если к ней прибавить

[1]) Статус (лат.) — стояние; статика — учение о равновесии.
[2]) Исаак Ньютон (1643—1727), основатель классической механики.

или от нее отнять взаимно-противоположные и равные силы. Если две силы действуют под углом, то их можно сложить по правилу параллелограмма. Диагональ параллелограмма определяет направление и величину силы, равнозначной двум силам, образующим стороны параллелограмма. Силы, образующие параллелограмм, называются *компонентами* (составляющими), равнозначная им сила (диагональ) — *результирующей* (Стевин, 1548—1620 г.). Экспериментальная

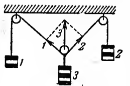


Рис. 11. Параллелограмм сил.

проверка этого положения возможна посредством подвеса грузиков на нити, переброшенной через неподвижные блоки (рис. 11). Результирующая сил *1* и *2* есть сила тяги *3*, равная и противоположная весу среднего подвешенного груза. Угол между компонентами зависит от величины выбранных грузов. Результирующая направлена вертикально (вверх) и численно равна силе тяжести среднего груза. Три пространственные силы имеют результирующей диагональ параллелепипеда, построенного на трех компонентах (рис. 12). При сложении трех и более сил на плоскости повторное применение уже знакомого правила силового параллелограмма приводит к силовому многоугольнику. Сложение выполняется таким образом, что начало вектора, изображающего каждую следующую силу,

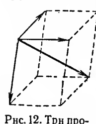


Рис. 12. Три пространственные силы с общей точкой приложения.

прикладывается к концу (стрелке) вектора, изображающего предыдущую силу. Если *силовой многоугольник замкнут*, то силы *уравновешены*. Если же многоугольник разомкнут, то линия, соединяющая его начальную точку с концом последней силы, определяет результирующую складываемых сил (рис. 13, пунктирная стрелка). Не менее существенным, чем сложение сил и получение равнодействующей, является разложение сил на компоненты заданного

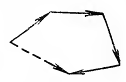


Рис. 13. Многоугольник сил.

направления (рис. 14). Часто компоненты взаимно перпендикулярны и представляют собой силы давления и тяги.

Расчет силового параллелограмма: По теореме косинусов: $R^2 = P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\alpha$.

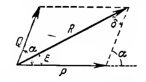


Рис. 14. Разложение силы на две составляющие.

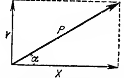


Рис. 15. Разложение силы на две взаимно-перпендикулярные составляющие.

По теореме синусов: $P : Q : R = \sin\delta : \sin\varepsilon : \sin\alpha$; $\delta + \varepsilon = \alpha$. Разложение силы на две взаимно-перпендикулярные компоненты (рис. 15):

$$X = P\cos\alpha;\quad Y = P\sin\alpha;\quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{Y}{X}.$$

Непараллельные силы, лежащие в одной плоскости, можно смещать вдоль линий их действия до попарного пересечения в одной точке (рис. 16).

Параллельные силы. Следует различать три случая: параллельные одинаково направленные силы; параллельные противоположно направленные силы различной величины; параллельные противоположно направленные равные силы.

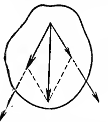


Рис. 16. Сложение двух сил, действующих под углом.

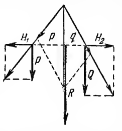


Рис. 17. Сложение двух параллельных одинаково направленных сил.

1. Параллельные одинаково направленные силы можно сложить при помощи введения вспомогательных равных и противоположно направленных сил; полученные непараллельные равнодействующие этих сил сводят в общую точку и вычисляют результирующую силу (рис. 17).

Результирующая двух параллельных одинакового направленных сил равна сумме слагаемых сил. Точка приложения результирующей силы делит прямую, проходящую через точки приложения слагаемых сил, на отрезки, обратно пропорциональные величинам сил:

$$P:Q=q:p \quad \text{или} \quad Pp=Qq.$$

2. Две параллельные противоположно направленные силы различной величины могут быть превращены в непараллельные и сложены при помощи введения двух вспомогательных одинаковых и противоположно направленных сил (рис. 18). После отнятия вспомогательных сил получаем:

Результирующая равна разности параллельных сил и направлена в сторону большей силы. Точка ее приложения лежит за силами на продолжении линии, соединяющей точки приложения слагаемых сил:

$$P:Q=q:p \text{ или } Pp=Qq.$$

3. Параллельные противоположно направленные равные силы не имеют результирующей; они образуют *пару* сил, вызывающую *вращательное движение*.



Рис. 18. Сложение двух параллельных неравных противоположно направленных сил.

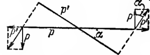


Рис. 19. Эквивалентные пары сил.

Действие пары сил однозначно определяется произведением числового значения силы P на расстояние p между их точками приложения. Pp называется моментом пары, p — плечом пары. Отсюда следует, что пару сил можно произвольно смещать на плоскости или заменять

другой, лишь бы сохранялось равенство $Pp = P'p'$. При прибавлении к паре двух вспомогательных, равных, но противоположно направленных сил получается новая пара с одинаковым моментом

$$Pp = \frac{P}{\cos\alpha} 2 \frac{p}{2} \cos\alpha = P'p' \quad \text{(рис. 19).}$$

Действие пары сил не зависит от положения точки вращения (в плоскости пары).

Равновесие вращающегося тела

На тело действуют две силы. Если одна из точек, лежащих на линии действия результирующей, закреплена, то тело может лишь вращаться. Тогда результирующая уравновешивается равной и противоположной силой, возникающей в закрепленной точке, и тело остается в равновесии. Условие равновесия тела с постоянной точкой вращения следующее: $Pp = Qq$.

Условие равновесия вращающегося тела:
$Pp = Qq.$

Произведение силы на перпендикулярный отрезок от оси вращения до линии действия силы называется *вращающим моментом*, или сокращенно моментом. Вращающий момент для разных точек тела различен. Там, где может возникнуть неясность, нужно выражаться точнее: вращающий момент силы P по отношению к точке D. Тело, способное только вращаться, будет в равновесии под действием двух сил в том случае, если вращающие моменты равны и противоположны.

Этот закон находит применение в рычагах (стр. 30). Условия равновесия рычага следующие:

Сила $\times$ на плечо силы $=$ весу груза $\times$ на его плечо
$Pp = Qq$; закон рычага.

Этот закон может быть распространен на произвольно большое число параллельных сил.

Условие равновесия рычага выполняется, когда сумма вращающих моментов, действующих по часовой стрелке, равна сумме вращающих моментов, действующих против часовой стрелки. Говорят также: сумма правовращающих моментов равна сумме левовращающих моментов.

Центр тяжести

На отдельные частицы твердого тела действуют силы тяжести $G_1, G_2, G_3, \ldots, G_n$. Эти параллельные силы можно сложить и получить результирующую, величина которой равна весу тела. Если подвесить тело за какую-либо точку, то оно будет вращаться под действием вращающего момента силы тяжести до тех пор, пока направление действия силы тяжести не пройдет через точку подвеса. Если тело подвесить за какую-либо другую точку, то получится другое направление действия силы тяжести. Оба направления пересекаются в одной точке, называемой центром тяжести тела. Если заменить силы тяжести отдельных частиц тела результирующей силой тяжести — весом тела, то центром тяжести будет такая точка тела, через которую при любом положении тела будет проходить направление действия силы тяжести. По отношению к центру тяжести вращательные моменты сил тяжести уравновешены.

> Можно считать, что в центре тяжести сконцентрирован общий вес тела

Если тело может вращаться вокруг оси, то оно будет в равновесии, когда его центр тяжести находится в вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения.

Нахождение центра тяжести является задачей интегрального исчисления; простыми расчетами можно вычислить центры тяжести только для тел правильной формы.

Положения центра тяжести. Треугольники: точка пересечения медиан. Практическое нахождение центра тяжести плоского тела: последовательное подвешивание за две точки. Каждое подвешивание дает направление силы тяжести; точка их пересечения и есть центр тяжести.

Виды равновесия

Устойчивое равновесие. Центр тяжести S лежит на одной вертикали с точкой подвеса O и ниже нее. При подъеме свободного конца тела, подвешенного выше центра тяжести, оно начинает вращаться; вращательный момент равен произведению веса на расстояние центра тяжести от вертикали, проходящей через точку подвеса. Этот вращающий момент приводит тело в положение устойчивого равновесия (рис. 20, *а*).

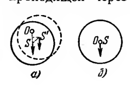


Рис. 20. Виды равновесия.

Безразличное равновесие. Центр тяжести находится в точке подвеса. Тело находится в равновесии в любом положении (рис. 20, *б*).

Неустойчивое равновесие. Центр тяжести находится на одной вертикали с точкой подвеса и выше нее. Малейший толчок переводит тело в положение устойчивого равновесия (рис. 20, *в*).

Устойчивость положения. Если тело закреплено в нескольких точках, то его равновесие может быть устойчивым, даже если его центр тяжести лежит выше точек опоры. Сила, необходимая для того, чтобы опрокинуть тело, является мерой его устойчивости. Устойчивость тела тем больше, чем больше площадь его опоры и чем ниже расположен его центр тяжести.

б) Простые машины

Рычаг. Рычаг находится в равновесии, когда действующие вращательные моменты равны и противоположны.

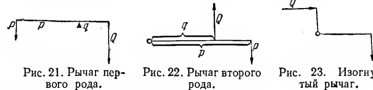


Рис. 21. Рычаг первого рода. Рис. 22. Рычаг второго рода. Рис. 23. Изогнутый рычаг.

Рычаг первого рода (рис. 21): $Pp = Qq$.

Рычаг второго рода (рис. 22): $Pp - Qq = 0$.

Угловой рычаг связывает изменение направления силы с изменением ее величины (рис. 23).

Применения. Рычаг второго рода: предплечье, тачка, щипцы для орехов, предохранительный клапан паровой

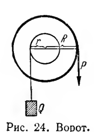


Рис. 24. Ворот.

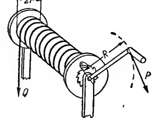


Рис. 25. Лебедка.

машины. Рычаг первого рода: клещи, ножницы, рычажные весы.

Ворот и лебедка. Ворот (рис. 24) состоит из двух соединенных наглухо блоков, сидящих на общей оси. Закон рычага выражает условие равновесия:

$$PR = Qr \quad \text{или} \quad P = Q\frac{r}{R}.$$

У лебедки большой блок ворота заменен рукояткой (R). С канатным барабаном (r) связано зубчатое колесо, которое

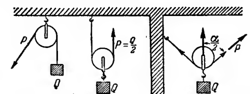


Рис. 26. Неподвижный и подвижный блоки.

сцепляется с запорной щеколдой, чтобы рукоятка не могла развернуться в обратную сторону (рис. 25).

Блок (рис. 26). Неподвижный блок служит только для изменения направления силы, он не дает выигрыша в силе. Подвижный блок уменьшает силу в два раза, половину веса груза принимает на себя точка подвеса.

При наклонно прикрепленном канате выполняется правило параллелограмма:

$$P=\frac{Q}{2}:\cos\frac{\alpha}{2}.$$

Полиспасты. Полиспасты представляют систему блоков, соединенных в общем держателе.

Обычный полиспаст с n неподвижными и n подвижными блоками (рис. 27):

$$P=\frac{Q}{2n}.$$

Пояснение. Представим себе, что трос между блоками разрезан; каждый его конец испытывает нагрузку $\frac{Q}{2n}$; сле-

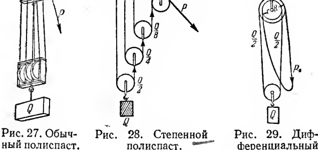


Рис. 27. Обычный полиспаст. Рис. 28. Степенной полиспаст. Рис. 29. Дифференциальный полиспаст.

довательно, также и тот конец, к которому приложена сила P.

Степенной полиспаст (рис. 28): $P=\frac{Q}{2^n}$,

Пояснение. Каждый подвижный блок делит нагрузку пополам. Степенной полиспаст мало употребителен из-за своей громоздкости.

Дифференциальный полиспаст (рис. 29):

$$P=\frac{R-r}{2R}Q.$$

Пояснение. Вращающие моменты:

$$\frac{Q}{2}r+PR=\frac{Q}{2}R.$$

Для всех простых машин пригодно золотое правило механики:

> Что выиграно в силе, то проиграно в пути;
> ни выигрыша, ни проигрыша в работе не происходит.
> Машины служат для изменения условий работы, но не дают выигрыша в работе.

Весы. Рычажные весы подчиняются законам рычага.

Равноплечие весы. Устойчивое равновесие, центр тяжести под центром вращения. Чувствительность весов растет вместе с длиной коромысла и убывает с возрастанием веса коромысла (коромысло весов делают решетчатым).

Чувствительность измеряется при помощи перегрузка X, дающего некоторое отклонение α (рис. 30).

$$d = s \sin\alpha, \quad p = l\cos\alpha,$$

$$(P+X)p = Pp + Gd; \quad X = \frac{Gd}{p} = \frac{Gs\sin\alpha}{l\cos\alpha}, \quad X = \frac{Gs}{l}\operatorname{tg}\alpha,$$

G — вес коромысла, l — длина плеча коромысла, s — расстояние центра тяжести от оси вращения. Двойное взвешивание уменьшает ошибку измерения. Взвешиваемый груз Q кладется один раз на левую чашку весов и один раз

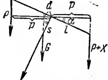


Рис. 30. Чувствительность весов.

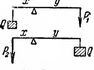


Рис. 31. Взвешивание на неравноплечих весах.

на правую; находятся значения веса P_1 и P_2; пусть длины плеч равны x и y (рис. 31):

$$Qx = P_1 y, \quad P_2 x = Qy, \quad Q^2 = P_1 P_2, \quad Q = \sqrt{P_1 P_2}.$$

Истинным значением веса является среднее геометрическое из обоих взвешиваний. Для практических целей применяется в большинстве случаев среднее арифметическое, которое несколько больше, чем среднее геометрическое.

Неравноплечие весы (безмен) (рис. 32). Взвешиваемый груз подвешивается на короткий конец рычага; подвижный грузик находится на длинном плече.

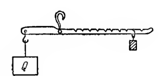


Рис. 32. Безмен.

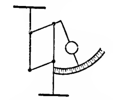


Рис. 33. Почтовые весы.

Почтовые весы (рис. 33). При нагрузке весов чашка их может перемещаться только в вертикальном направлении, так как ее ось составляет часть шарнирного параллелограмма. Верхняя сторона параллелограмма является одновременно коротким плечом изогнутого рычага, длинное плечо которого утяжелено на конце. Длинное плечо скользит по шкале. В случае равновесия оба вращающих момента равны и противоположны.

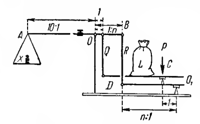


Рис. 34. Десятичные весы.

Десятичные весы (рис. 34). На десятичных весах гири уравновешивают десятикратный груз. Правое плечо рычага первого рода AB разделено в таком же отношении, как рычаг второго рода O_1D; левое плечо рычага AB в десять раз превышает длину одного деления шкалы, нанесенной на правом плече. Для рычага первого рода получается следующее уравнение моментов:

$$X \cdot 10 = Q \cdot 1 + Rn.$$

Для рычага второго рода:

$$\frac{0 = Rn - P \cdot 1}{X \cdot 10 = Q + P = L} \cdot$$

Наклонная плоскость (рис. 35).

Крутизна: $\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{b}$; сила (скатывающая), действующая вдоль наклонной плоскости $H = G\sin\alpha = G\,\frac{h}{l}$. Сила давления на плоскость $N = G\cos\alpha = G\,\frac{b}{l}$.

Нагрузка : силе давления : силе скатывания = длина : : основанию : высоте.

Трение. Силы трения представляют силы сопротивления, которые проявляются, когда начинает действовать какая

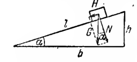


Рис. 35. Наклонная плоскость.

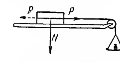


Рис. 36. Трение скольжения.

либо другая сила. Сила трения противодействует силе скатывания. Различают два вида трения: трение скольжения (рис. 36) и трение качения.

Коэффициент трения μ есть отношение силы трения к силе давления на поверхность: $\mu = \frac{R}{N}$.

μ может быть определено при помощи наклонной плоскости с переменным углом. Брусок начинает скользить, если H равно R.

$$\mu = \frac{G\sin\alpha}{G\cos\alpha} = \operatorname{tg}\alpha; \qquad \boxed{R = \mu N.}$$

Сила трения не зависит от величины соприкасающихся поверхностей.

Коэффициенты трения

Дерево по дереву 20 ÷ 48%, при смазке 6 ÷ 17%.

Металл по металлу, сухой 15 ÷ 24%, при смазке 6 ÷ 11%.

Металл по льду 2 ÷ 3%.

Трение качения: металл по металлу 1%.

Винт и клин

При одном обороте винт смещается на свой шаг h. Шаг винта может быть вычислен по свойствам наклонной плоскости (рис. 37). Из золотого правила механики следует:

$$P \cdot 2\pi R = Qh.$$

$$\boxed{P = \frac{h}{2\pi R} Q.}$$

Винты находят применение в давящих и подъемных приспособлениях (прессы, шлюзовые затворы) и, прежде всего, как скрепляющие винты, вследствие большого трения, воз-

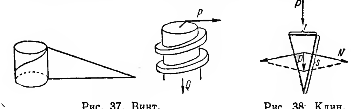


Рис. 37. Винт. Рис. 38. Клин.

никающего при вращении винта. Клин (рис. 38) состоит из двух наклонных плоскостей, сложенных основаниями. Сила P, действующая на основание клина, может быть разложена на две равные нормальные компоненты N. Из подобия треугольников следует:

$$P : N = r : s. \qquad \boxed{P = N\frac{r}{s}.}$$

Чем острее угол клина, тем бо́льшую разрушающую силу можно получить.

в) Атомы и молекулы

В химии установилось представление, что тела состоят из мельчайших частиц, связанных между собой силами взаимного притяжения; наименьшей физической частицей

вещества является *молекула* [1]). Молекулы могут разлагаться на *атомы* [2]) только химическим путем. Прежде атомы и молекулы представляли себе как маленькие упругие шарики. Теперь мы знаем, что и эти атомы не являются мельчайшими частичками материи, что и они в свою очередь представляют «планетную систему» крошечных размеров.

Для нашего рассмотрения мы будем пользоваться представлением об упругих шариках до тех пор, пока мы не получим достаточных знаний, чтобы иметь возможность понять строение атома.

Молекулярная гипотеза разъясняет также поведение вещества в его агрегатных состояниях [3]): твердом, жидком и газообразном. В твердом теле молекулы так уплотнены и так крепко связаны силами взаимного притяжения, что каждая из них может только колебаться около некоторого положения равновесия. В жидком состоянии сцепление значительно ослаблено, молекулы скользят одна мимо другой; жидкость не имеет определенной формы, но имеет определенный объем. Проявление движения молекул в жидкости исследовал в 1827 г. ботаник Броун. Это движение называется молекулярным движением. В хороший микроскоп видно, как взвешенные в жидкости частички органической краски совершают беспорядочное, зигзагообразное (так называемое броуновское) движение. Частички краски непрерывно сталкиваются с невидимыми молекулами воды, вследствие чего совершают беспорядочные колебания. В газе сцепление между молекулами ослаблено до такой степени, что он способен занять любой предоставленный ему объем.

г) Молекулярные силы в твердых телах

Твердость тела обусловлена *силами сцепления*, действующими между молекулами.

Смачиванием называется сцепление между молекулами различных веществ (стекла и воды). Смачиванием объясняется крашение (рисование), склеивание, пайка, никелировка, хромирование и т. п.

---

[1]) Молекула (лат.) — маленькая частичка.
[2]) Атомос (греческ.) — неделимый.
[3]) Агрегаре (лат.) — накапливать.

Твердостью называется сопротивление тела, которое оно оказывает вдавливанию или царапанью его поверхности.

Шкала твердости (минералогическая):
1. тальк, 2. гипс, 3. известковый шпат, 4. плавиковый шпат, 5. апатит, 6. полевой шпат, 7. кварц, 8. топаз, 9. корунд, 10. алмаз.

Каждое тело из этой последовательности царапает любое предыдущее.

Тела, которые после растяжения или сжатия восстанавливают свою первоначальную форму, называются *упругими*; тела, сохраняющие деформацию, — *пластическими*. Если деформация превышает известный предел (предел упругости), тело не полностью восстанавливает свою форму.

Коэффициент растяжения ε представляет растяжение, возникающее в стержне длиной 1 *м* с поперечным сечением 1 *мм*^{2} при воздействии на него растягивающей силой 1 *кп*. Коэффициент растяжения ε представляет собой константу вещества; ее обратное значение называется *модулем растяжения* (E).

$$\text{Растяжение } d = \varepsilon \frac{lP}{s},$$

l — длина в *м*, P — растягивающая сила в *кп*, s — поперечное сечение в *мм*^{2}, $\varepsilon = \frac{1}{E} \left[\frac{мм^2}{kп}\right]$. Тогда d получается в *м*.

Предел прочности (на растяжение) представляет собой ту силу, при которой наступает разрыв.

Предел прочности (на раздавливание) представляет ту силу, при которой происходит раздавливание.

Изгиб и кручение также вызывают упругие силы сопротивления. Для всех упругих сил применим *закон Гука* (1678):

Ниже предела упругости растяжение, сжатие, изгиб и кручение пропорциональны деформирующим силам.

Технически допустимая нагрузка значительно меньше предела прочности. *Запасом прочности* называют отношение предела прочности на растяжение или раздавливание к допустимому напряжению.

Вещество	Коэффициент растяжения ε	Предел прочности на растяжение, $кп/мм^2$	Предел прочности на раздавливание, $кп/мм^2$
Сталь	0,000045	$70 \div 120$	$100 \div 300$
Железо	0,000053	$40 \div 60$	$60 \div 90$
Медь	0,00008	$15 \div 30$	$28 \div 40$
Алюминий	0,00014	$17 \div 20$	$7,5 \div 10$
Свинец	0,0006	$1,4 \div 1,8$	5
Стекло	0,00014	$0,7 \div 3$	27
Дуб (параллельно волокнам)	0,0007	$6 \div 10$	5,4

2. КИНЕМАТИКА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Кинематика есть учение о движении, не рассматривающее сил, его вызывающих.

а) Равномерное движение

Движение называется равномерным, если тело проходит в любые одинаковые промежутки времени одинаковые отрезки пути. В каждом движении мы понимаем под скоростью отношение пути ко времени его прохождения. В равномерном движении скорость измеряется путем, пройденным в единицу времени. В неравномерном движении скорость меняется со временем, мы обозначаем ее буквой v (переменная скорость) и при этом должны указывать момент времени, к которому ее значение относится. Практически мы измеряем мгновенную скорость; при этом мы делим элементарный отрезок пути Δs на промежуток времени Δt. При уменьшении обоих элементов мы получаем предел:

$$\text{Мгновенная скорость } v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

Для равномерного движения получаем:

$$s = ct.$$

Здесь s обозначает путь, c — постоянную скорость и t — время, отсчитанное с того момента, когда путь $s = 0$.

В диаграмме скорость — время (рис. 39) путь измеряется площадью прямоугольника:

$$s = ct\,\frac{см}{сек}\,сек = см\ ^{1)}.$$

Равномерное движение есть абстракция; в природе не существует полностью равномерного движения. Оно могло бы существовать, если бы тело подверглось одному толчку и больше никакие силы на него не действовали бы. Но так как в природе нет никакого движения без трения, то каждое такое движение сводится к равномерно-замедленному. Равномерное движение возникает в том случае, когда на тело действуют постоянная сила и равная и противоположно направленная сила трения, как, например, при движении тела в воде или в случае падения капли в воздухе. Приблизительно равномерное движение получается при качении шарика по гладкой горизонтальной поверхности. Формула равномерного движения сохраняет свое значение при замене величины c средним значением скорости.

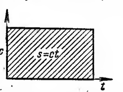


Рис. 39. Диаграмма скорость — время для прямолинейного равномерного движения.

Закон инерции (Галилей, 1638, Ньютон, 1687). Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока какая-либо сила не выведет его из этого состояния. Имеет смысл и обратная формулировка этого положения. Если нарушается состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, это значит, что на тело действует внешняя сила.

Средние скорости

Пешеход	1,1 ÷ 1,7 *м/сек* =	4 ÷ 6 *км/час*
Лошадь (рысью)	2,5 *м/сек* =	9 *км/час*
Скорый поезд	15 ÷ 28 *м/сек* =	54 ÷ 100 *км/час*
Почтовый голубь	30 *м/сек* =	108 *км/час*
Средний ветер	4 ÷ 11 *м/сек* =	14 ÷ 40 *км/час*
Звук в воздухе	335 *м/сек* =	1205 *км/час*
Точки на экваторе	463 *м/сек* =	1667 *км/час*
Свет	300 000 *км/сек.*	

[1]) Размерность $\frac{см}{сек}$ для обозначения скорости показывает, как производная единица образуется из основных (см. стр. 46).

б) Равномерно-ускоренное движение

Ускорение выражается отношением приращения скорости к промежутку времени, в течение которого произошло это приращение:

$$b=\frac{v_t-v_0}{t-t_0},$$

v_t — конечная скорость (переменная) через $t-t_0$ секунд, v_0 — начальная скорость, t_0 — начальное время.

Рис. 40. Диаграмма скорость — время для равномерно-ускоренного движения.

При равномерно-ускоренном (или замедленном) движении b — величина постоянная, соответственно положительная или отрицательная. Если это движение заменить равномерным со средней скоростью v_m, то тело должно пройти тот же путь (рис. 40):

$$v_t=v_0\pm bt,\quad v_m=\frac{v_0+v_t}{2}=v_0\pm\frac{b}{2}t,$$

$$s=v_mt=v_0t\pm\frac{1}{2}bt^2.$$

$$\text{При } v_0=0:\quad v_t=bt \quad\text{и}\quad 2bs=b^2t^2=v_t^2,$$

$$v_t=\sqrt{2bs}.$$

Применение. Наклонный желоб; *прибор Вильдермута*. Наклонный желоб представляет собой наклонную плоскость с малым углом наклона. По желобу может катиться шарик, им пользуются, чтобы доказать, что пути, пройденные в отдельные равные промежутки времени, относятся как последовательные нечетные числа.

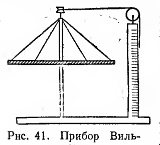


Рис. 41. Прибор Вильдермута.

В приборе Вильдермута (рис. 41) движение правого груза под действием силы тяжести тормозится относительно большой массой, которая приводится в движение одновременно с правым грузом. С этим прибором легко получить маленькие, легко доступные измерению ускорения.

Частные случаи: *свободное падение и вертикальный бросок*.

Свободное падение: ускорение силы тяжести g; $v_0 = 0$:

$$v_t = gt; \quad s = \frac{1}{2} gt^2; \quad v_t = \sqrt{2gs}.$$

Отрезки путей, проходимые телом в каждую секунду, относятся, как последовательные нечетные числа; полные пути — как квадраты времен.

Вертикальный бросок

$$\text{вниз: } v_t = v_0 + gt, \quad s = v_0 t + \frac{gt^2}{2},$$

$$\text{вверх: } v_t = v_0 - gt, \quad s = v_0 t - \frac{1}{2} gt^2.$$

Тело поднимается, пока v_t не станет равно нулю; это время называется длительностью подъема T; высота подъема H.

$$0 = v_0 - gT, \quad T = \frac{v_0}{g},$$

$$H = v_0 T - \frac{1}{2} gT^2 = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Время подъема = времени падения.

в) Неравномерное движение

Мгновенная скорость: $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{dt}{ds}$.

Мгновенное ускорение:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}.$$

Пусть $s = \Sigma(v_t \, \Delta t)$ = площади, полученной при помощи графика изменения скорости со временем для неравномерного движения (рис. 42).

Рис. 42. Диаграмма скорость — время для неравномерного движения.

г) Сложение движений

Опыт (рис. 43). Левый шарик удерживается пружиной, правый лежит на подставке. Если ударить молотком по пружине, то левый шарик падает свободно, а правый получает боковой удар и падает на землю по кривой. Оба шарика падают на землю одновременно.

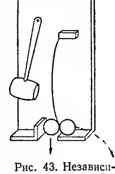


Рис. 43. Независимость движений.

Принцип независимости движений. Если тело одновременно участвует в нескольких движениях, то его координаты для момента времени t можно определить, складывая его смещения, как векторы.

Закон относительности движений в механике. Если некоторые тела движутся в замкнутом пространстве, которое в свою очередь участвует в равномерном перемещении, то это не оказывает никакого влияния на движение этих тел. Поэтому законы механики применимы, например, на движущемся пароходе.

Бросок под углом. Начальная скорость c может быть разложена на горизонтальную слагающую v_x и на вертикальную слагающую v_y. На величину v_x сила тяжести не оказывает влияния, а v_y в каждую секунду уменьшается на величину g.

$$\text{Скорость: } v_x = c\cos\alpha, \quad v_y = c\sin\alpha - gt,$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

$$\text{Путь: } x = ct\cos\alpha, \quad y = ct\sin\alpha - \frac{g}{2}t^2.$$

Перемещение будет происходить по параболе, если можно пренебречь сопротивлением воздуха (малые скорости!).

Высота и дальность полета. Брошенное тело поднимается, пока v_y не станет равным нулю. Время подъема T вычисляется из условия: $0 = c\sin\alpha - gT$, $T = \frac{c\sin\alpha}{g}$.

Высота подъема H вычисляется подстановкой T в формулу $y = ct\sin\alpha - \frac{g}{2}t^2$, $H = \frac{c^2\sin^2\alpha}{2g}$. Вследствие симметрии траектории брошенного тела дальность полета

выражается удвоенным значением горизонтальной компоненты за время T:

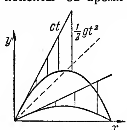


Рис. 44. Навесная и настильная траектории.

$$W = 2X = 2c\cos\alpha\frac{c}{g}\sin\alpha = \frac{c^2\sin 2\alpha}{g}.$$

Наибольшей дальности полета достигают при угле бросания $\alpha = 45°$, так как тогда $\sin 2\alpha$ принимает свое максимальное значение, равное 1. Брошенное тело может достичь некоторой точки горизонтальной плоскости двумя различными путями: по навесной траектории — при большом угле наклона ($\alpha > 45°$) или по настильной траектории (при малом угле наклона, $\alpha < 45°$) (рис. 44).

3. СИЛА И ДВИЖЕНИЕ

а) Сила и масса

В статике изучается равновесие сил. После того как мы изучили в кинематике основные виды движения, мы будем считать в динамике силу причиной, вызывающей или изменяющей движение тела. Уже закон инерции гласит, что сила является причиной изменения движения. Благодаря силе движение ускоряется, либо, если вектор силы направлен противоположно направлению движения, замедляется.

Одинаковой мускульной силой (за равное время) тяжелому телу можно сообщить меньшую скорость, чем легкому. Тела оказывают действующей силе различное сопротивление. Это сопротивление изменению движения мы приписываем инерции тела и называем это сопротивление массой. Опыты, проведенные при помощи машины Атвуда, а также прибором Вильдермута, устанавливают, что ускорение пропорционально действующей силе.

Машина Атвуда (рис. 45) состоит из высокого штатива с сантиметровой шкалой, вверху которой укреплено легкое колесико. Через последнее перекинут шнур, на концах которого висят одинаковые грузы. Действующей силой служит маленький съемный перегрузок. Посредством переме-

щающегося кольца, через которое беспрепятственно могут проскакивать грузы, перегрузок может быть снят в конце различных промежутков времени; таким образом измеряется достигнутая конечная скорость. Три величины: сила, масса и ускорение — связаны основным законом механики:

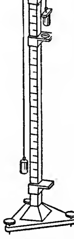


Рис. 45. Машина Атвуда.

Сила = масса × ускорение $F = mb.$

До сих пор мы измеряли силы посредством растяжения спиральной пружины. Натяжение пружины вызывает в ней противодействие, которое равно и противоположно силе растяжения. Этот способ измерения силы мы называем *статическим измерением силы.*

Теперь мы изучаем силу как причину, вызывающую изменение движения, и приходим ко второму способу измерения силы — *динамическому.*

Для этой цели в основном законе механики для коэффициента пропорциональности m мы должны установить еще одну единицу измерения.

Прежде единицей массы служил 1 $см^3$ воды при 4°С; ныне — эталон килограмма, хранящийся в Париже. Единицей массы служит 1 грамм (*г*), 1000 *г* составляют 1 килограмм (*кг*), 1000 *кг* — 1 тонну (*т*).

В то время как вес тела зависит от места измерения, масса является независимой величиной. 1 *г* весит на широте 45° 1 *п*, на Северном полюсе немного больше, на экваторе — меньше.

Масса измеряется в килограммах (*кг*) и граммах (*г*). Масса не зависит от места измерения.



В повседневной жизни и в технике обозначения *кг* и *г* применяются также как единицы веса, потому что обычный способ взвешивания на рычажных весах дает сравнение масс. Только взвешивание на пружинных весах дает измерение силы (веса). Ясно, что понятия массы и веса нужно строго различать; поэтому необходимо также подчеркнуть различие введением различных обозначений.

Из основного закона следует выражение *для веса:*

$$\boxed{G = mg.}$$

Здесь g обозначает ускорение силы тяжести. Это уравнение дает динамическое выражение силы и ведет к установлению новой единицы силы.

> Сила, которая сообщает массе в 1 *г* ускорение в 1 *см* $сек^{-2}$, называется 1 дина (*дн*)[1]).

1 дина является физической единицей измерения силы в противоположность технической единице 1 *кп*, применявшейся нами до сих пор.

В физике мы сводим все измерения к трем основным единицам: к единице длины *см*, единице массы *г* и единице времени *сек*. Все остальные единицы выводятся из основных. Чтобы познакомить с этим выводом, мы покажем, как образуется каждая новая единица из основных единиц, и назовем их новые единицы измерения. Для скорости мы имеем единицу $\frac{см}{сек}$ или *см* $сек^{-1}$, уже встречавшуюся; для ускорения — *см* $сек^{-2}$.

Физическая единица силы имеет размерность: *г см* $сек^{-2}$. На 1 *г* массы действует сила (сила веса!) $G = 1 \cdot 981$ *г см* $сек^{-2}$. Если ускорение не должно превышать 1 *см* $сек^{-2}$, как это требуется в нашем определении дины, то движущую силу нужно выбирать меньше, чем сила тяжести, и именно она должна быть $\frac{1}{981}$ долей той силы, которой тело с массой в 1 *г* давит на подставку. Тут играет роль то же соображение, что и в машине Атвуда, где маленький перегрузок приводит

[1]) Динамис по-гречески — сила.

в движение большую массу. Физическая единица силы — очень маленькая величина, она соответствует силе давления приблизительно в 1 миллипонд (*мп*), точнее, $\frac{1}{981}$ *п*.

Сила, равная 10^5 дин, называется 1 *большая дина* или 1 *ньютон* [1]).

Если в технике измеряют силу в *кп*, то из основного уравнения $F = mb$ вытекает необходимость установить для массы новую единицу измерения. Если сила измеряется в *кп*, а ускорение в *мсек*$^{-2}$, то этим выбором однозначно определяется единица массы.

Теперь масса — производная единица: 1 *кп* = M × ×9,81 *м сек*$^{-2}$. Чтобы удовлетворить основному уравнению, мы должны принять за техническую единицу массы такую массу, которая в каком-либо месте, где ускорение равно 9,81 *м* · *сек*$^{-2}$, весит 9,81 *кп*. *При измерении силы в кп нужно измерять массу в технических единицах массы.* Численное значение массы в технических единицах массы получают путем деления веса свободнопадающей массы на ускорение силы тяжести.

1 техн. единица массы равна 9,81 *кг*.

б) Работа и мощность

В физике под работой понимают произведение силы на путь. При этом предполагается, что сила вдоль всего пути остается постоянной и направлена вдоль пути:

Работа = сила × путь: $A = F \cdot s$.

Если направление силы составляет с направлением пути угол α, то $A = F s \cos \alpha$. Если, например, тянут лодку, то силу тяги можно разложить на две составляющие; движение лодки вперед происходит за счет составляющей, направленной по оси лодки. Перпендикулярная этому направлению составляющая притягивала бы лодку к берегу, если бы не

[1]) Названа в честь английского физика *Ньютона*. Наравне с употребляемой до сих пор системой СГС была введена система МКС. За единицу силы в этой системе принят 1 ньютон = 10^5 дин.

возникала противодействующая сила руля, которая уничтожает эту составляющую. Физик измеряет работу в динах × сантиметр или в ньютонах × метр.

$$1\ \text{дн} \times 1\ \text{см} = 1\ \text{эрг}$$ [1].

Эрг, так же как и дина, очень маленькая единица:

10^7 эргов = 1 джоулю [2]; 1 ньютон × 1 метр = 1 джоулю.

Техник измеряет работу в килопондметрах (прежде килограммометрах!)

$$1\ \text{кп} \times 1\ \text{м} = 1\ \text{кпм}.$$

Принятое в физике определение работы немного отличается от повседневного житейского понятия работы. В физическом смысле при равномерном перемещении массы в один килограмм вытянутой рукой в горизонтальном направлении работа не совершается, так как в этом случае сила (тяжести) и путь взаимно перпендикулярны ($\cos 90° = 0$!).

Мускульная работа, связанная с вытягиванием руки, не входит в физическое определение работы.

Работа, произведенная в единицу времени, называется *мощностью* (или эффективностью работы):

Физическая единица $1\ \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ и $1\ \frac{\text{дж}}{\text{сек}} = 1$ ватт (*вт*) [3].

Техническая единица $1\ \frac{\text{кпм}}{\text{сек}}$ и $75\ \frac{\text{кпм}}{\text{сек}} = 1$ *лс*.

Лошадиная сила (*лс*) — чисто расчетная величина; лошадь никогда при длительной работе не может развить мощности, равной $75\ \frac{\text{кпм}}{\text{сек}}$.

---

[1] Эргон по-гречески — работа, труд.

[2] Названа в честь английского физика *Джоуля* (1818—1889).

[3] Названа в честь *Джемса Уатта* (1736—1819), одного из изобретателей паровой машины.

в) Физическая и техническая системы единиц

Основные единицы:	физические	технические
	см, г, сек	*м, кп, сек*
Производные единицы:		
скорость:	*см* $сек^{-1}$	*м* $сек^{-1}$
ускорение:	*см* $сек^{-2}$	*м* $сек^{-2}$
сила:	1 дина (*г см* $сек^{-2}$) 1 ньютон = 10^5 дин	1 килопонд
масса:	1 грамм	*кп* $сек^2$ $м^{-1}$
работа:	1 эрг= 1 *дн* · 1 *см* 1 джоуль = 10^7 *эрг*	1 *кпм* (*кп* · *м*)
Мощность:	1 *эрг* $сек^{-1}$ 1 ватт $= 1\frac{дж}{сек}$	1 *кпм* $сек^{-1}$ 1 *лс* $= 75\,\frac{кпм}{сек}$

Соотношения:

1 *кп* = 981 000 дин = 9,81 большой дины; 1 дина $= \frac{1}{981}$ *п*,

1 большая дина $= \frac{1}{9{,}81}$ *кп*,

1 *кпм* = 9,81 джоуля; 1 джоуль = 0,102 *кпм* $= \frac{1}{10}$ *кпм*,

1 *лс* $= 75\,\frac{кпм}{сек} = 75 \cdot 9{,}81\,\frac{дж}{сек} = 736$ *вт*,

1 киловатт (*кв*) $= 1000 \cdot 10^7\,\frac{эрг}{сек} = 1{,}36$ *лс*.

г) Удельный вес и плотность

Тела одинаковых размеров весят различно. Чтобы иметь возможность вычислить веса тел известных объемов, необходимо знать вес единицы объема.

Удельный вес тела выражается отношением веса тела к его объему:

$$\text{Удельный вес} = \frac{\text{вес}}{\text{объем}}; \quad \gamma = \frac{G}{V}\ \frac{п}{см^3}.$$

Плотностью тела называется отношение его массы к объему:

$$\text{Плотность} = \frac{\text{масса}}{\text{объем}}; \quad \rho = \frac{m}{V}\ \frac{г}{см^3}.$$

Удельные веса (в $\Gamma/см^3$) и *плотности* (в $г/см^3$) *для твердых, жидких и газообразных тел* [1]:

Платина	21,5	Мрамор	2,8	Сернистый углерод	1,26
Золото	19,3	Оконное стекло	2,6	Вода	1,00
Свинец	11,3	Кирпич	1,5	Бензол	0,88
Серебро	10,5	Лед	0,92	Керосин	0,80
Медь	8,9	Дуб	0,8	Спирт	0,79
Железо	7,2—7,8	Сосна	0,6	Бензин	0,69
Цинк	7,1				
Алюминий	2,7				

Газы при 0° и 760 *мм* рт. ст.

Воздух	0,001293
Углекислый газ	0,001977
Кислород	0,001429
Светильный газ	0,0006
Водород	0,00009

Удельный вес и плотность — именованные числа. Иногда употребляют показатели удельного веса и плотности — отвлеченные числа.

Показатель удельного веса показывает, во сколько раз вес данного вещества больше веса воды в таком же объеме; показатель плотности показывает, во сколько раз масса данного вещества больше массы воды в том же объеме. Для газов часто берут отношение к воздуху.

д) Энергия

Энергия — это способность производить работу. Механическая энергия бывает двух видов: энергия движения (кинетическая энергия, энергия падающего тела) и энергия положения (потенциальная энергия [2]), энергия поднятого груза, энергия натянутой пружины).

Увеличение энергии движения: $Fs=\frac{1}{2}mv_t^2-\frac{1}{2}mv_0^2.$

Пояснение. $F=mb,\ v_t=v_0+bt,\ s=\frac{v_0+v_t}{2}t,$

$$Fs=mb\frac{v_0+v_t}{2}t=m\left(\frac{v_t-v_0}{t}\right)\left(\frac{v_0+v_t}{2}\right)t=\frac{1}{2}mv_t^2-\frac{1}{2}mv_0^2.$$

[1] Числовые значения удельного веса и плотности в выбранных единицах совпадают. (*Прим. ред.*)

[2] Потенс (лат.) — сильный, могущественный.

Действие силы F на протяжении пути s выражается в увеличении энергии движения. Уменьшение энергии движения выражает совершенную телом работу.

Энергия положения: $E = mgh$.

Для того чтобы груз G поднять на высоту h, необходимо затратить работу $Gh = mgh$. Если тело падает с высоты h, то энергия положения превращается в энергию движения:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad v_0 = 0, \quad Gh = mgh = \frac{1}{2} m \cdot 2gh = \frac{1}{2} mv^2.$$

Закон сохранения механической энергии был расширен и дополнен *Робертом Майером* и *Гельмгольцем* и превращен в общий закон сохранения энергии.

Все процессы в природе связаны с превращением энергии. При этом сумма всех видов энергии всех тел, участвующих в процессе, есть величина постоянная. Превращение энергии происходит в строго определенных количественных соотношениях.

1 ватт

$$0{,}24 \text{ кал сек}^{-1} \longleftrightarrow \frac{1}{9{,}81} \text{ кпм сек}^{-1}.$$

е) Импульс и удар

Если постоянная сила F действует на тело, первоначально находившееся в покое, в течение t секунд, то получим:

$$Ft = mbt = mv \qquad (v = 0 + bt).$$

Произведение Ft называется *импульсом силы* и служит мерой силового воздействия, mv называется *количеством движения* или *импульсом*.

Если сила — переменная, то $\sum F\Delta t = \sum m\Delta v = m \sum \Delta v = mv$, так как $\sum \Delta v = v$.

Если на тело действует сила, то импульс силы равен изменению импульсов (изменению количества движения)

$$\sum F\Delta t = m(v_t - v_0).$$

Уравнение импульсов применяется главным образом для случаев кратковременного действия силы. Каждый *удар* вызывает *противодействующий удар* (силу реакции).

Их импульсы численно равны:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2.$$

Скорости обратно пропорциональны массам.

Центральный удар неупругих шаров. Два неупругих шарика обладают одинаково направленными скоростями v_1 и v_2; их общая скорость после удара пусть будет v_m; тогда получаем:

$$m_1(v_1 - v_m) = m_2(v_m - v_2); \quad v_m = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Центральный удар упругих шаров. При соударении неупругих шаров их деформация сохраняется, а при соударении упругих шаров восстановление формы создает второй импульс обратного направления.

Назовем скорости после упругого удара v_3 и v_4; тогда получим $(v_m - v_3)m_1 = (v_4 - v_m)m_2$ для второй части процесса соударения и $(v_1 - v_m)m_1 = (v_m - v_2)m_2$ — для первой части. Так как импульсы, получаемые каждым шаром в обеих частях процесса, численно равны, то $v_1 - v_m = v_m - v_3$, $v_4 - v_m = v_m - v_2$,

$$v_3 = 2v_m - v_1 = 2\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - v_1,$$

$$v_4 = 2v_m - v_2 = 2\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - v_2.$$

Косой упругий удар

Путем разложения скорости косого удара на две компоненты: вдоль стенки и перпендикулярно к ней, мы можем получить *закон отражения*:

Угол падения равен углу отражения.

На рис. 46 изображено отражение упругого шарика от неподвижной стенки. Вектор скорости v падающего под углом шарика может быть разложен на две компоненты: v_x — перпендикулярную к стенке и v_y — параллельную стенке. При ударе о стенку компонента v_x превращается в компоненту $-v_x$, в то время как v_y остается без изменения; $-v_x$ и v_y дают равнодействующую, представляющую скорость и направление отскока шарика. Направление падения образует с нормалью (перпендикуляром в точку падения) угол падения, равный углу отражения, образованному нормалью с направлением отскока.

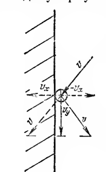


Рис. 46. Косой удар.

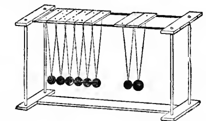


Рис. 47. Проверка закона упругого удара.

Подтверждение закона упругого удара на приборе (рис. 47). Он состоит из ряда бифилярно[1]) подвешенных упругих шариков. Если отвести один шарик и дать ему возможность ударить соседний, то сообщенный импульс распространится по всему ряду и последний шарик поднимется на ту же высоту, что и первый. Для двух шариков, различных по массе, скорости обратно пропорциональны массам.

4. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

а) Круговое движение

Если привести диск в равномерное вращение, то угол поворота φ возрастает со временем равномерно; линейная скорость какой-либо точки окружности диска зависит также от

[1]) Бис (лат.) — два раза (двойной), филум (лат.) — нить; бифилярный — двуниточный.

ее расстояния от оси вращения. В равномерном вращательном движении понятие угловой скорости соответствует понятию линейной скорости в равномерном прямолинейном движении. Угол вращения в большинстве случаев измеряют в дуговых единицах, т. е. длиной дуги круга с радиусом, равным 1, стягивающей центральный угол φ; при этом угловая скорость ω численно равна линейной скорости какой-либо точки на окружности единичного радиуса. Один полный оборот происходит за время T; соответствующий путь за это время есть 2π. Тогда

$$\text{Угловая скорость } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Если диск совершает в секунду ν оборотов, то

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \text{и} \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

ν называется *частотой*, T — *периодом колебания*. Для точки круга, отстоящей от центра вращения на расстоянии r, имеем:

$$\text{Линейная скорость } v = r\omega = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi\nu r.$$

В равномерном круговом движении ω постоянна; в неравномерном круговом движении, например у затормаживающегося диска, угловая скорость переменна.

Угловое ускорение (угловое замедление)

$$\beta = \frac{\omega_t - \omega_0}{t - t_0} = \frac{\Delta a}{\Delta t}.$$

В равномерном круговом движении численное значение линейной скорости каждой точки также остается постоянным, меняется только направление скорости. Изменение направления может быть вызвано только действием силы. Так как последняя направлена к центру круга, то она называется центростремительной силой:

$$\text{Центростремительная сила } Z = \frac{mv^2}{r}.$$

Пояснение. Круговое равномерное движение можно разложить на два движения: движение тангенциальное — равномерное и движение в направлении центра притяжения (рис. 48) — ускоренное. Постоянная притягивающая сила

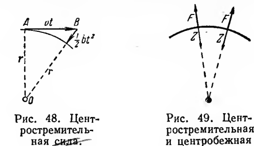


Рис. 48. Центростремительная сила.

Рис. 49. Центростремительная и центробежная силы.

Z создает равномерно-ускоренное движение. Путь в тангенциальном направлении: vt, путь к центру вращения: $\frac{1}{2}bt^2$.

По теореме Пифагора получается:

$$r^2+(vt)^2=\left(r+\frac{b}{2}t^2\right)^2, \qquad v^2=rb+\frac{b^2t^2}{4}.$$

При малом t последним членом можно пренебречь: $b=\frac{v^2}{r}$ — центростремительное ускорение,

$$Z=mb=\frac{mv^2}{r}=mr\omega^2.$$

Центростремительной силе Z, заставляющей тело совершать (вместо прямолинейного) круговое движение, тело противопоставляет сопротивление инерции; последнее называется центробежной силой F (рис. 49). Центробежная сила, как показывает формула $Z=mr\omega^2$, тем больше, чем больше расстояние от оси вращения.

Центробежная сила равна и противоположна по направлению центростремительной силе.

Опыты с центробежной машиной: упругий обруч (приплюснутость Земли!) (рис. 50, *а*).

Круговой упругий обруч превращается в эллипс при быстром вращении, причем его малая ось совпадает с осью вращения. Шарообразный сосуд со ртутью и окрашенной водой (рис. 50, *б*). Плотность ртути больше, чем воды, поэтому ртуть развивает бо́льшую центробежную силу и образует центральное кольцо; боковые кольца образует вода.

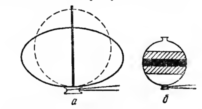


Рис. 50. Влияние центростремительной силы.

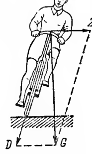


Рис. 51. Велосипедист на кривой.

Применение центробежной силы: центрифуги, центробежный регулятор паровой машины, бельевая сушилка.

Создание центростремительных сил: повышение внешнего рельса на закруглениях ж.-д. пути, наклон велосипеда к центру круга (рис. 51). При наклоне велосипеда вес разлагается на горизонтальную центростремительную силу Z и прижимающую силу D, проходящую в плоскости колеса.

б) Вращающий момент и момент инерции

При вращательном движении действие тангенциальной силы существенно зависит от расстояния до оси вращения. Маховик легче привести во вращение за обод, чем за спицу вблизи оси. Для сообщения углового ускорения мало одной силы, нужен соответствующий момент силы (рис. 52).

Вращающий момент $M = Fr$.

Вращающие моменты изображаются также векторами (рис. 53).

Вектор вращающего момента восстанавливается в точке вращения, перпендикулярно к плоскости момента, и ука-

зывает сторону, с которой глаз видит движение происходящим против часовой стрелки.

На основании второго закона механики $F = mb$. Для вращательного движения линейное ускорение

$$b = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta (r\omega)}{\Delta t} = r\frac{\Delta \omega}{\Delta t} = r\beta;$$

следовательно, вращающий момент $M = Fr = mr\beta r = mr^2\beta$. Если сравнить прямолинейное движение (основной закон $F = mb$) с круговым движением ($M = Fr = mr^2\beta$), то можно усмотреть, что уравнение для вращательного движения получается из уравнения прямолинейного движения, в котором F заменяют на M, m заменяют на mr^2, b заменяют на β. Произведение mr^2 обозначают буквой J_1 и называют *моментом инерции* ($J_1 = mr^2$).

Рис. 52. Вращающий момент.

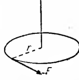


Рис. 53. Вектор вращающего момента.

Момент инерции аналогичен инертной массе m в прямолинейном движении. Для системы точечных масс получается:

$$\sum Fr = \sum mr^2\beta = J\beta,$$

$J = \sum mr^2$ называется моментом инерции системы.

Так как момент инерции зависит от распределения масс, то при смещении оси вращения изменяется и значение момента инерции. Для случая параллельных осей вращения применим закон Штейнера: момент инерции для произвольной оси складывается из двух моментов инерции: момента инерции Md^2 для случая, когда вся масса M сосредоточена в точке, отстоящей от оси вращения на расстоянии d, и момента инерции по отношению к оси, параллельной данной и проходящей через центр тяжести:

$$\boxed{\sum mr^2 = \sum mr_1^2 + Md^2.}$$

Вычисление моментов инерции является задачей интегрального исчисления; относительно экспериментального определения смотри физический маятник.

Сравнение поступательного и вращательного движений

Поступательное движение		Вращательное движение	
Траектории отдельных частиц параллельны		Траектории отдельных частиц тела — концентрические окружности	
Скорость	$v=\frac{ds}{dt}$	Угловая скорость	$\omega=\frac{d\varphi}{dt}$
Ускорение	$b=\frac{dv}{dt}$	Угловое ускорение	$\beta=\frac{d\omega}{dt}$
Масса	$m=\sum m_i$	Момент инерции	$J=\sum m_i r_i^2$
Сила	F	Вращающий момент	$M=Fr$
Закон действия силы	$F=mb$	Закон действия силы	$M=J\beta$
Энергия движения	$E=\frac{1}{2}mv^2$	Энергия движения	$E=\frac{1}{2}J\omega^2$

Движение тела складывается из поступательного движения и вращательного движения. Сила, приложенная к центру тяжести, сообщает телу поступательное движение; результирующий вращательный момент сил, не проходящих через центр тяжести, — вращательное движение. Результирующим является в общем случае винтовое движение.

в) Центральное движение (движение под действием центростремительных сил)

Под центральным движением понимают движение тела по плоской траектории под действием силы, постоянно направленной в неподвижную точку, — центростремительной силы. Для любого центрального движения справедлив *закон площадей:* линия, соединяющая тело с центром силы, за одинаковые промежутки времени описывает равные площади (рис. 54).

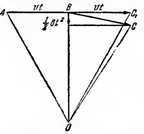


Рис. 54. Теорема площадей.

Пояснение. $\triangle\ ABO = \triangle\ BCO$, так как $AB = BC$, точка O общая для обоих треугольников. $\triangle OBC_1 = \triangle OBC$, так как у них общее основание и равные высоты. Следовательно, треугольник $ABO = BCO$. Если сделать эти треугольники сколь угодно малыми, то путь по ломаной $A\ B\ C$... превра-

щается в криволинейный. Планеты совершают центральное движение; центром притяжения является Солнце.

Планеты подчиняются *законам Кеплера*:

1. Орбиты планет суть эллипсы, в одном из фокусов которых находится Солнце (1609).
2. Подвижный радиус Солнце—планета описывает в одинаковые времена одинаковые площади (закон площадей, 1609).
3. Квадраты времен обращения планет вокруг Солнца относятся, как кубы их средних расстояний от Солнца:

$$T_1^2 : T_2^2 = r_1^3 : r_2^3.$$

Следствие из закона площадей: находясь ближе к Солнцу, Земля движется по своей орбите быстрее, чем вдали от него. В зимние месяцы Земля находится вблизи Солнца (рис. 55).



Рис. 55. Афелий и перигелий.

Зимнее полугодие в северном полушарии на 7 дней короче, чем летнее полугодие. Из 3-го закона Кеплера, который был установлен чисто эмпирически из множества отдельных наблюдений, Ньютон вывел физические следствия. Он нашел в 1680 г. закон *всемирного тяготения*: два тела притягиваются друг к другу с силой, которая направлена по линии, их соединяющей, пропорциональна их массам, и обратно пропорциональна квадрату их взаимного расстояния (размеры тел очень малы по сравнению с расстоянием).

Сила притяжения $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ *дн*,

Постоянная тяготения $\gamma = 6{,}7 \cdot 10^{-8} \frac{см^3}{г\, сек^2}$.

γ можно было определить из опыта измерением притяжения двух свинцовых шаров.

Пояснение к закону тяготения: центростремительная сила

$$Z = \frac{mv^2}{r} = mr\left(\frac{v}{r}\right)^2 = mr\omega^2 = mr\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \left(\frac{4\pi^2}{T^2} r^3\right)\frac{m}{r^2}.$$

Выражение в скобках согласно 3-му закону Кеплера есть величина постоянная для всех планет, т. е. сила притяжения пропорциональна массе и обратно пропорциональна квадрату расстояния.

На системе Земля — Луна Ньютон подтвердил свой закон и показал, что Луна движется по своей орбите благодаря притяжению Земли.

Из закона тяготения следует, что вес тела массы m, находящегося на поверхности Земли (M — масса Земли, R — земной радиус): $G = mg = \gamma \frac{mM}{R^2}$; отсюда масса Земли равна $M = \frac{gR^2}{\gamma} = 5{,}9 \cdot 10^{24}$ *кг* (≈ 6000 триллионов тонн).

Легко подсчитать, что плотность Земли $\rho = 5{,}5$ *г/см*^{3}. Но так как плотность каменной оболочки Земли составляет только 2,5—3 *г/см*^{3}, то внутренние слои Земли (ее ядро) должны иметь плотность порядка 7—8 *г/см*^{3} (гипотеза никелево-железного ядра).

Вследствие вращения Земли ускорение свободного падения уменьшается на величину компоненты центростремительной силы, направленной по нормали в данной точке земной поверхности. Сама же центростремительная сила лежит в плоскости круга широты, соответствующего данной точке. Точка на экваторе Земли движется со скоростью $v_0 = 463$ *м/сек*. Поэтому на экваторе ускорение центростремительной силы

$$b_0 = \frac{v_0^2}{R} = R\omega^2 = 3{,}37 \ \text{см/сек}^2.$$

На широте φ радиус вращения равен $R \cos \varphi$, поэтому центростремительное ускорение $b_\varphi = 3{,}37 \cos \varphi$. Разложим его на составляющие вдоль земной поверхности b_x и перпендикулярно к ней b_y. Тогда

$$b_y = b_\varphi \cos \varphi = 3{,}37 \cos^2 \varphi.$$

Поэтому на широте φ ускорение свободного падения равно $g_\varphi = g' - 3{,}37 \cos^2\varphi$, где g' — ускорение, которое существовало бы на неподвижной Земле. Далее, на экваторе $g_0 = g' - 3{,}37$.

Вычитая, освобождаемся от g' и получаем:

$$g_\varphi - g_0 = 3{,}37 - 3{,}37 \cos^2 \varphi; \quad g_\varphi = g_0 + 3{,}37 \sin^2 \varphi.$$

г) Вращение волчка

Свободной осью тела называется ось, относительно которой сумма всех центростремительных сил равна нулю. Свободная ось всегда проходит через центр тяжести тела.

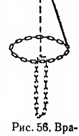


Рис. 56. Вращающаяся цепочка.

Опыт с центробежной машиной: кольцо из цепочки (рис. 56). Если привести в быстрое вращение вокруг вертикальной оси нить с подвешенной к ней цепочкой, то последняя, вопреки силе тяжести, поднимается, располагается в горизонтальной плоскости и принимает форму окружности; в этом положении все центростремительные силы симметричны относительно оси вращения.

Всякое свободно вращающееся тело устанавливается таким же образом.

Волчок — вращающееся вокруг свободной оси твердое тело — сохраняет неизменным направление оси, пока он не подвержен действию внешних сил. При действии внешней силы ось волчка поворачивается в направлении, перпендикулярном к направлению действующей силы. При постоянном действии силы ось волчка описывает коническую поверхность. Такое движение называется *прецессией* (рис. 57).

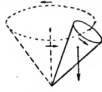


Рис. 57. Прецессия волчка.

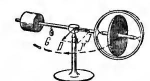


Рис. 58. Гироскоп Фесселя.

Опыт с прибором Фесселя (рис. 58). Вращающийся волчок обладает моментом импульса, изображаемым вектором J; небольшой перегрузок G создает момент D; вектор D расположен перпендикулярно к вектору J. Суммирование дает новый вектор J', определяющий новое положение оси волчка. При повороте явление повторяется, и ось

волчка вращается в горизонтальной плоскости в направлении стрелки часов.

Приложение. Гироскопический компас (рис. 59).

Электродвигатель диаметром около 14 *см* совершает 300 об/сек. Он связан с поплавком, плавающим в ртути, заполняющей коробку компаса. Благодаря низкому расположению центра тяжести ось волчка все время расположена горизонтально. Под влиянием вращения Земли волчок устанавливается в плоскости меридиана, т. е. его ось располагается в направлении север — юг.

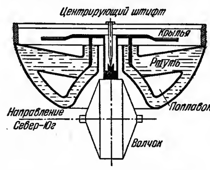


Рис. 59. Гироскопический компас.

Земля представляет также гигантский волчок (рис. 60). Вследствие возмущения, вызываемого притяжением экваториального выступа Земли (она не строго шарообразна) Солнцем, ось вращения Земли совершает прецессионное движение. Она описывает коническую поверхность с углом раствора, равным 23,5°, в течение 26 000 лет. Луна оказывает дополнительное возмущение, нутацию, накладывающуюся на прецессионное движение.

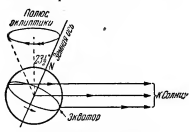


Рис. 60. Земля как волчок.

д) Гармонические колебания

1. *Конический маятник.* В коническом маятнике (рис. 61) тело маятника (небольшое по размерам тело) вращается в горизонтальной плоскости. Угол, образуемый нитью подвеса с вертикалью, проведенной через точку подвеса, остается постоянным. Вес маятника G можно разложить на две составляющие: центростремительную силу Z, направ-

ленную к центру круга, и силу Q, направленную вдоль нити:

$$Z:G=r:h;\quad Z=\frac{rG}{h};\quad Z=\frac{mv^2}{r}=mr\frac{4\pi^2}{T^2}.$$

Отсюда получаем:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}.$$

Для малых углов раствора конуса $h\approx l$; тогда

Период колебаний конического маятника $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

2. Если спроектировать движение конического маятника на вертикальную плоскость, то тень маятника совер-

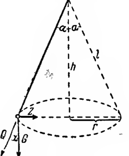
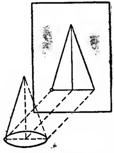


Рис. 61. Конический маятник.


Рис. 62. Гармоническое колебание.

шает *гармоническое движение* (рис. 62). Закон гармонического движения легко получить на основе кругового движения (рис. 63):

$$P=Z\cos\varphi=Z\frac{x}{r}=kx;\quad k=\frac{Z}{r}=\text{const}.$$

Гармоническое движение характеризуется тем, что сила, направленная к положению равновесия, пропорциональна удалению маятника от положения равновесия. В процессе колебаний происходит повторяющееся превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно. В точках

поворота скорость равна нулю, в положении равновесия скорость максимальна. Период гармонического колебания:

$$\text{из } Z = \frac{4\pi^2}{T^2} mr \text{ следует } T = 2\pi \sqrt{m \frac{r}{Z}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} .$$

3. *Плоский маятник.* а) *Математический маятник.* Колебания маятника, подвешенного на нити (рис. 64),

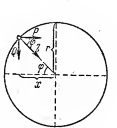


Рис. 63. Силы при гармоническом движении.

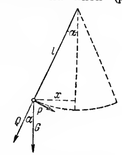


Рис. 64. Плоский математический маятник.

при малых углах отклонения (не превышающих 5°) можно считать гармоническими:

$$P : G = \sin\alpha = x : l; \quad P = \frac{mgx}{l} = kx,$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{mg}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} .$$

При этом следует подчеркнуть, что за период принимается время движения маятника в одну и другую сторону.

Законы маятника:

1. Период колебаний не зависит от массы маятника.
2. Для малых колебаний период колебаний не зависит от размаха колебаний.
3. При малых отклонениях период пропорционален корню квадратному из длины маятника.

Приложения. Секундным маятником называют маятник, время движения которого в одну сторону равно 1 *сек.* Период его колебаний $T = 2$ секундам. Поэтому длина маятника

$$l = 99{,}4 \text{ см.}$$

Измерение ускорения свободного падения при помощи маятника. Измеряя T и l, можно вычислить g.

Опыт с маятником Фуко, доказывающий вращение Земли вокруг ее оси, основан на свойстве маятника сохранять неизменным в пространстве положение плоскости колебаний при вращении подвеса (свободная ось, перпендикулярная к плоскости колебаний) (рис. 65).

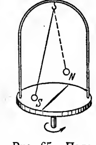


Рис. 65. Пояснение опыта Фуко с маятником.

б) *Физический маятник* (рис. 66). Всякое твердое тело, способное колебаться около устойчивого положения равновесия, представляет физический маятник. При небольших амплитудах колебаний это движение можно считать гармоническим. У физического маятника период колебаний зависит от распределения масс. Частицы, лежащие ближе к оси вращения, чем центр тяжести, ускоряют движение; частицы же, расположенные дальше от оси вращения, замедляют его. Отсюда следует, что должен существовать математический маятник, колеблющийся с тем же периодом, как и данный физический. Длина такого маятника называется *приведенной длиной физического маятника*.

Рис. 66. Физический маятник.

В центре тяжести S приложена вся сила тяжести G, создающая вращающий момент $M = Gx = Gs \sin \alpha$. Угловое ускорение маятника равно

$$\beta = \frac{M}{J} = \frac{mgs \sin \alpha}{J} \quad (J \text{ — момент инерции}).$$

На математический маятник с тем же периодом действует сила $mg \sin \alpha$, создающая момент $mgl_0 \sin \alpha$. Но так как у математического маятника вся масса сосредоточена в одной точке, то его момент инерции равен ml_0^2. Поэтому для математического маятника

$$\beta = \frac{mgl_0 \sin \alpha}{ml_0^2} = \frac{g \sin \alpha}{l_0}.$$

Но так как оба угловых ускорения равны, то получаем:

$$l_0 = \frac{J}{ms}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}}.$$

Период колебаний физического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgs}}$.

mgs представляет вращающий момент, действующий на физический маятник, если его отклонить на 90°. Этот наибольший момент обозначают D_{max}. Тогда получается:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D_{max}}}.$$

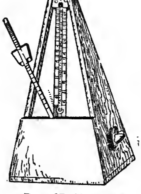


Рис. 67. Метроном.

Приложение. Метроном служит для задания ритма в музыке. Он представляет физический маятник с двумя колеблющимися массами (рис. 67). Перемещая подвижной груз, меняют момент инерции и тем самым период колебаний. При перемещении подвижного груза вверх его расстояние от оси вращения увеличивается, а с ним растет и момент инерции. При этом центр тяжести системы приближается к оси вращения. Поэтому расстояние s, стоящее в знаменателе выражения, определяющего период колебаний, уменьшается. Метроном колеблется медленнее.

Экспериментальное *определение момента инерции* по колебаниям маятника. Измеряя T, расстояние s от центра тяжести до оси вращения и вес, находим:

$$J = \frac{T^2}{4\pi^2} D_{max}.$$

Б. ЖИДКОСТИ

1. ГИДРОСТАТИКА

а) Общие свойства жидкостей

Жидкости отличаются от твердых тел подвижностью частиц. Жидкости не обладают упругостью формы, но обладают упругостью объема; они принимают форму любого сосуда, но почти совсем несжимаемы. Свободная поверх-

ность жидкости всегда устанавливается перпендикулярно к направлению силы тяжести; если размеры поверхности невелики, то ее можно считать плоской. Большие поверхности (море) принимают форму поверхности шара.

Под давлением понимают силу, приходящуюся на единицу поверхности и перпендикулярную к последней.

$$\text{Давление} = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} \left[\frac{n}{см^2}\right] \quad \text{или} \quad \left[\frac{кп}{см^2}\right].$$

Исключительно малую сжимаемость жидкости можно обнаружить при помощи *пьезометра* (рис. 68). В сосуде P находится обезгаженная жидкость. Капиллярная трубка, которой заканчивается сосуд, погружена в ртуть. Внешний сосуд также заполнен водой и закрыт подвижным поршнем. На воду оказывается сильное внешнее давление, которое передается ею ртути. Уменьшение объема пьезометра проявляется в подъеме ртути в капиллярной трубке. Коэффициент сжатия определяет уменьшение объема, равного 1 *см*³, при давлении в 1 *кп/см*²; он равен для воды $50 \cdot 10^{-6}$, для спирта $120 \cdot 10^{-6}$, для ртути $4 \cdot 10^{-6}$ первоначального объема. Поэтому *жидкости могут практически считаться несжимаемыми.*

Рис. 68. Пьезометр.

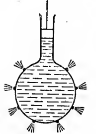
Всесторонняя передача давления

Основной опыт. В стенках шаровой колбы (рис. 69) проделаны узкие отверстия. Если давить на жидкость сверху, то жидкость вытекает равномерно во все стороны.

Измерение. Прибор Рекнагеля (рис. 70) позволяет проверить всестороннюю передачу давления. При этом $F_1 : F_2 = S_1 : S_2$. Одинаковые площади испытывают равные давления:

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}.$$

Применение. В гидравлическом прессе (рис. 71) при подъеме рычага a насоса открывается донный клапан и в цилиндр втекает дополнительная масса жидкости. В это время в правом цилиндре имеется избыток давления и промежуточ-


Рис. 69. Шар Паскаля.

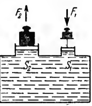


Рис. 70. Прибор Рекнагеля.

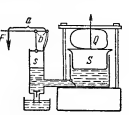
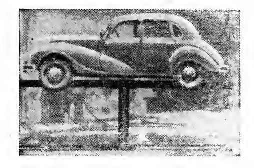


Рис. 71. Гидравлический пресс.

ный клапан закрывается. При опускании рычага a насоса поршень s давит на жидкость, донный клапан


Рис. 72. Подъемник.

закрывается, а избыточное давление открывает промежуточный клапан и вгоняет жидкость в правый цилиндр

$$Q = \frac{a}{b}\,\frac{S}{s}\,F.$$

На рис. 72 изображен гидравлический домкрат, служащий для подъема автомашин.

б) Давление на дно и стенки сосуда

Давление на дно сосуда равно весу столба жидкости с основанием в 1 *см*², находящегося над дном.

Гидростатическое давление $p = h\gamma$ (γ — удельный вес).

При помощи *прибора Паскаля* (рис. 73) доказывается, что давление на дно зависит только от высоты столба жидкости, но не от формы сосуда и общей массы жидкости, создающей столб данной высоты. Сосуды раз-

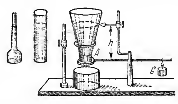


Рис. 73. Прибор Паскаля для изучения давления жидкости на дно сосуда.

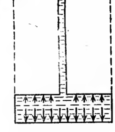


Рис. 74. Гидростатический парадокс.

личной формы имеют одинаковую площадь дна. Сосуды закрываются снизу металлической пластиной, прижимаемой к сосуду нагруженными рычажными весами. При достижении определенной одинаковой для всех сосудов высоты столба жидкости пластина отходит от дна, и жидкость выливается.

Гидростатическим парадоксом называют тот факт, что малая масса жидкости в дополнительной трубке оказывает решающее влияние на общую силу давления, испытываемую дном сосуда (рис. 74).

Боковое давление $p = h\gamma$.

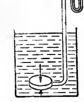


Рис. 75. Измеритель давления Хартля.

Здесь h есть глубина погружения центра тяжести рассматриваемой поверхности. Для доказательства служит измеритель давления Хартля (рис. 75). Цилиндрическая коробка с основанием, представляющим упругую мембрану, может поворачиваться на шарнире. Разность уровней в

манометре зависит лишь от глубины погружения, но не от ориентации коробки.

Подпорные стены (в водохранилищах, плотинах и т. д.) испытывают давление, возрастающее с глубиной. Это приходится учитывать и утолщать стены в нижней части (рис. 76).

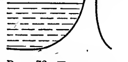


Рис. 76. Подпорная стенка.

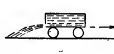


Рис. 77. Реактивная сила.

Вытекающая из бокового отверстия струя жидкости создает силу реакции (рис. 77) в виде соответствующего давления на противоположную стенку. Тележка катится в направлении стрелки.

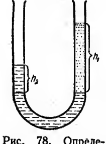


Рис. 78. Определение плотности в U-образной трубке.

В сообщающихся сосудах жидкость всегда стоит на одинаковом уровне. Поперечное сечение и масса жидкости не играют никакой роли.

Пояснение. Поперечное сечение трубки, соединяющей два сообщающихся сосуда, испытывает с обеих сторон равные и противоположные боковые давления — в противном случае происходило бы перемещение жидкости. Но одинаковые боковые давления могут возникать только в том случае, когда в обоих сосудах высоты уровней жидкости одинаковы.

Применение — водомерное стекло.

Жидкости различных удельных весов устанавливаются таким образом, что высоты их столбов обратно пропорциональны их удельным весам (рис. 78):

$$Sh_1\gamma_1 = Sh_2\gamma_2 \quad \text{или} \quad \gamma_1 : \gamma_2 = h_2 : h_1.$$

в) Выталкивающая сила

Кубик полностью погружен в жидкость. Тогда на его верхнюю грань действует сила $Sh_1\gamma$, на его нижнюю грань — сила $Sh_2\gamma$, соответствующая более глубокому погруже-

нию. Разность этих двух сил дает вертикальную, направленную вверх результирующую — выталкивающую, или подъемную, силу (рис. 79). Давления на все боковые грани взаимно уравновешиваются.

Основной опыт. Погружение пустой колбы в воду (рис. 80).

Измерение. Открытый с двух концов цилиндр с пристав-

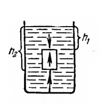


Рис. 79. Подъемная сила.

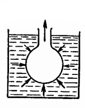


Рис. 80. Подъемная сила, испытываемая колбой.

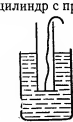


Рис. 81. Выталкивающая сила равна весу вытесненной жидкости.

ным дном погружается в воду. Если цилиндр наполнять водой как раз до верхнего уровня окружающей жидкости, то приставное дно отрывается (рис. 81).

Подъемная сила равна весу вытесненной телом жидкости.

Пояснение. Подъемная сила $Sh_2\gamma - Sh_1\gamma$;

$$G = S\gamma(h_2 - h_1) = \text{весу вытесненной жидкости.}$$

Закон Архимеда. Всякое тело, погруженное в жидкость, теряет в весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость.

Применение. Определение удельных весов гидростатическим взвешиванием (рис. 82).

Первое взвешивание — вес тела в воздухе G_1.

Второе взвешивание — вес тела, погруженного в воду, G_2.

Разность обоих весов характеризует объем тела. Поэтому численное значение удельного веса

$$\gamma = \frac{G_1}{G_1 - G_2}.$$

Гидростатические весы могут быть использованы для проверки закона Архимеда. Погружением тела в жидкость нарушают равновесие нагруженных весов. Если вылить вытесненную жидкость в стаканчик, находящийся на чашке весов (см. рис. 82), то равновесие восстанавливается.

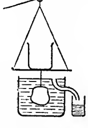


Рис. 82. Гидростатические весы.

В *весах Мора* используется стеклянное тело для определения выталкивающей силы неизвестной жидкости. При погружении его в воду выталкивающая сила компенсируется подвижным грузом. При погружении в неизвестную жидкость большей плотности для восстановления равновесия необходим добавочный груз. Отсчитывая по шкале положения груза, получают значения удельного веса.

Тело *тонет* в жидкости, если его вес больше выталкивающей силы; оно *находится во взвешенном состоянии*, если вес равен выталкивающей силе; оно *плавает*, если его вес меньше выталкивающей силы. При этом оно погружается до тех пор, пока вес вытесненной жидкости не станет равным весу тела.

Закон плавания. Вес тела=весу вытесненной жидкости.

Плавание устойчиво, если центр тяжести тела лежит ниже центра тяжести вытесненной массы жидкости. Кроме того, состояние остается устойчивым, пока метацентр (точка пересечения вектора выталкивающей силы с вертикальной осью симметрии тела) остается выше центра тяжести (рис. 83).

Рис. 83. Метацентр.

Применение. Ареометры служат для определения плотности жидкости по глубине погружения поплавка. Градуировка производится эмпирически в зависимости от области применения. Измерители кислотности дают процент кислоты, лактометры — процент содержания жира.

2. ГИДРОДИНАМИКА

а) Законы стационарного течения

«Идеальной жидкостью» называется несжимаемая и лишенная сил трения жидкость.

Поток называется стационарным, если через любое поперечное сечение трубы в единицу времени проходят равные объемы жидкости:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2.$$

Если стационарный поток течет по трубопроводу с переменным сечением, то скорость течения v в каждом месте обратно пропорциональна поперечному сечению.



Рис. 84. Линии тока.

Опыт. Прибор Поля для наблюдения течения жидкости. Подкрашенные трубки жидкости характеризуют плотность линий тока и изменение скорости (рис. 84).

Закон *Торичелли* о вытекании жидкости из малых отверстий:

| Скорость истечения $v = \sqrt{2gh}$. |

Эта скорость равна скорости при свободном падении с высоты h (рис. 85).

Масса вытекающей жидкости

$$M = \rho S v = \rho S \sqrt{2gh},$$

S — поперечное сечение.

Рис. 85. Вытекание жидкости из отверстий.

Вследствие трения у отверстия вытекающая масса в случае воды составляет всего 65% теоретической. На скорость истечения влияет величина внутреннего трения

жидкости. *Вязкость* жидкости служит мерой внутреннего трения. Единицы вязкости:

1 пуаз = 100 сантипуазам (*г/см сек*) *мп/см сек.*

Течение по трубам. При неизменном сечении давление в стационарном потоке жидкости, обладающей трением, линейно уменьшается при удалении от начала трубы. В этом можно убедиться при помощи прибора с вертикальными трубками (рис. 86). Вертикальные трубки, вделанные в горизонтальную трубу, служат манометрами. Высота столбиков жидко-

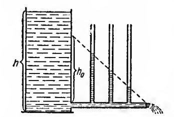
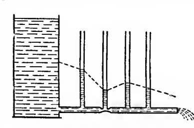


Рис. 86. Падение давления в горизонтальной трубе.


Рис. 87. Влияние сужения в трубе.

сти, измеряющих давление, линейно убывает при удалении от начала трубы. Если вода вытекает из отверстия на конце прибора с некоторой скоростью, то линия, соединяющая вершины столбиков, пересекает левый резервуар ниже поверхности жидкости (рис. 86). Высоту h_0 называют *высотой давления*, избыток высоты $(h - h_0)$ — *высотой скорости*. Высота давления характеризует потерю давления на преодоление трения в трубе, высота скорости определяет скорость вытекания жидкости.


Рис. 88. Всасывающее действие струи.

В сужении трубки давление падает. Для ускорения жидкости в узком месте должна затрачиваться работа; вследствие этого и происходит падение давления. После сужения происходит замедление жидкости; возникающее при этом противодавление и объясняет новое нарастание давления (рис. 87).

Уменьшение давления в сужении приводит к возникновению всасывающего действия (рис. 88).

Применение. Водоструйный *насос Бунзена* (рис. 89). Вода вытекает с повышенной скоростью из узкой трубки и разбрызгивается в свободном пространстве на капли. Вблизи сужения возникает всасывающее действие. Капли жидкости захватывают с собой воздух, отсасываемый из резервуара.

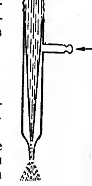


Рис. 89. Водоструйный насос.

б) Использование энергии воды

Старейшая форма: наливные и подливные колеса. Новая форма: водяные турбины.

1. *Реактивная турбина*. Неподвижное направляющее колесо сообщает струе воды боковое движение. Каналы рабочего колеса расположены перпендикулярно к этому направлению. Реактивное давление струи приводит рабочее колесо во вращение (рис. 90).

2. *Водоструйная турбина* (рис. 91). Эту турбину приводит во вращение струя воды, вытекающая из сопла с большой скоростью и ударяющая в лопатки колеса.



Рис. 90. К принципу действия реактивной турбины.



Рис. 91. К принципу действия колеса Пельтона (водоструйной турбины).

Мощность ежесекундно вытекающей жидкости, имеющей вес G и действующую разность высот h, есть:

$$L = \frac{Gh}{75}\ [\textit{лс}].$$

Если измерять количество ежесекундно вытекающей жидкости (воды) в литрах (килограммах), то Gh представляет

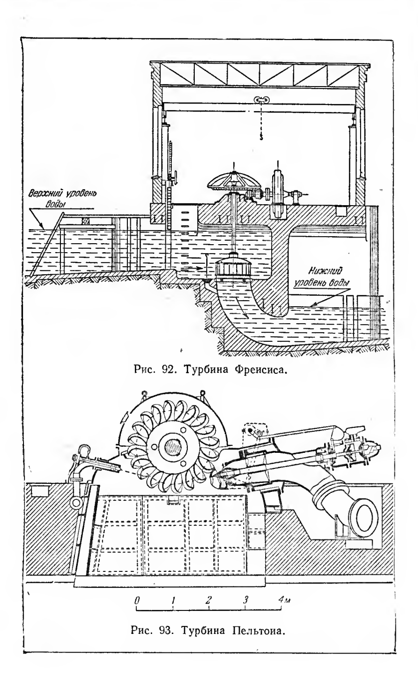


Рис. 92. Турбина Фреисиса.

Рис. 93. Турбина Пельтоиа.

потенциальную энергию, которая при падении воды превращается в кинетическую и тогда представляет ежесекундную работу, измеренную в *кпм/сек* (1 *лс* = 75 *кпм/сек*).

На гидростанции Вальшензее используется почти двухсотметровое падение воды. Шесть напорных труб диаметром по 2 *м* каждая подводят воду к турбинам. Четыре спиральные турбины Френсиса (рис. 92) по 24 000 *лс* каждая, совершающие по 500 об/мин, и две водоструйные турбины Пельтона (рис. 93) по 18 000 *лс*, совершающие по 250 об/мин, передают энергию генераторам переменного тока. Максимальная мощность станции — 132 000 *лс*, максимальный расход воды — 60 $м^3/сек$ [1]).

3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИЛЫ В ЖИДКОСТЯХ

а) Силы сцепления

Капля жидкости, освобожденная от действия внешних сил, принимает форму шара. При шаровой форме силы сцепления, действующие между молекулами, оказываются полностью симметричными.

Опыт. Капли масла в смеси воды и спирта (равная плотность!); масляные шарики плавают внутри жидкости.

Демонстрация сил сцепления (рис. 94). Смачиваемая (стеклянная) пластинка, соединенная с пружинными весами, находится на поверхности воды. При попытке поднять пластинку с ней вместе поднимается слой жидкости. В момент отрыва весы обнаруживают наличие некоторой силы (ее нельзя считать равной силам сцепления, но она зависит от наличия последних).

Рис. 94. Проявление сил сцепления.

Если молекула находится внутри жидкости, то силы притяжения со стороны ее соседок распределены симметрично. Радиусом действия молекулярных сил называют радиус шара, внутри которого эти силы имеют еще заметную

[1]) Крупнейшая гидростанция Европы — Куйбышевская — при ее завершении будет иметь 20 генераторов, развивающих мощность до 2850 тысяч *лс*. Сибирские гидростанции (Братская и др.) будут иметь еще большие мощности. *(Прим. ред.)*

величину. Если часть сферы молекулярного действия выходит за пределы жидкости (для молекул, расположенных вблизи поверхности), то соответствующая часть сил притяжения отпадает, симметрия нарушается (рис. 95). Заштрихованная часть сферы молекулярного действия не уничтожается противоположными силами симметричной части. Поэтому возникает сила, направленная внутрь жидкости. Для удаления молекулы из жидкости требуется приложить некоторую силу. Это немного похоже на наличие на поверхности жидкости упругой пленки, которая при удалении молекулы развивает упругие напряжения: *поверхностное натяжение*.

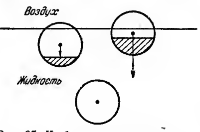
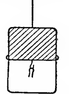


Рис. 95. К объяснению поверхностного натяжения.

Измерение поверхностного натяжения (рис. 96) может быть выполнено при помощи проволочной рамки и подвижной перемычки. В качестве жидкости удобно взять мыльный раствор. При измерении нужно учесть, что слой раствора имеет две поверхности. Коэффициент поверхностного натяжения определяет силу, действующую на каждый сантиметр длины пограничной линии жидкости.

Коэффициент поверхностного натяжения α в *мп/см* равен: воздух — вода 75; масло — воздух 33; вода — масло 20. Поверхностное натяжение масло — воздух превосходит натяжение масло — вода, но масляная капелька, помещенная на поверхность чистой воды, растекается по ней, так как поверхностное натяжение вода — воздух превосходит сумму двух других натяжений, поверхность же с наибольшим натяжением стремится стать наименьшей.


Рис. 96. Измерение поверхностного натяжения.

б) Краевые эффекты

На границу жидкости у стенки сосуда действуют одновременно силы сцепления между молекулами жидкости K и

силы взаимодействия жидкости и материала стенок A. В зависимости от того, какие из них больше, жидкость

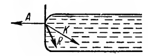


Рис. 97. Граница несмачивающей жидкости.

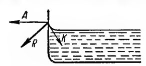


Рис. 98. Граница смачивающей жидкости.

называется смачивающей и несмачивающей (рис. 97 и 98).

В узких (капиллярных трубках) уровень смачивающей жидкости поднимается (капиллярное поднятие, рис. 99). При перевесе внутренних сил уровень жидкости опускается (капиллярная депрессия, рис. 100). Капиллярная сила $2\pi r\alpha$, действующая вдоль границы жидкости, уравновешивается весом столбика жидкости $\pi r^2 h\gamma$

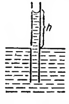


Рис. 99. Капиллярное поднятие смачивающей жидкости.

Рис. 100. Капиллярное опускание несмачивающей жидкости.

$$2\pi r\alpha = \pi r^2 h\gamma; \quad \alpha = \frac{hr}{2}\gamma.$$

в) Диффузия и осмос

Диффузией называется смешивание двух соприкасающихся жидкостей или газов различной плотности, происходящее независимо от действия силы тяжести (иногда вопреки ему), благодаря подвижности молекул. При этом общий объем смешавшихся веществ иногда становится меньше суммы объемов смешивающихся веществ (например, при диффузии спирта в воду).

Осмосом называется смешение двух жидкостей или газов через пористую перегородку, пропускающую молекулы одного из веществ, но задерживающую молекулы другого вещества. При этом давления по обе стороны перегородки

изменяются. Осмотическое давление играет существенную роль при поднятии питательных соков по стеблям растений, а также в процессах, происходящих в клетках животных.

В. ГАЗЫ

1. СВОЙСТВА ПОКОЯЩИХСЯ ГАЗОВ

а) Общие свойства

В газах силы сцепления между молекулами настолько незначительны, что молекулы занимают весь объем, предоставленный газу. Для сравнения масс газов их следует приводить к *нормальным условиям* (давление 760 *мм* рт. ст., температура 0° С). Газы обладают весом.

Опыт. Определение веса 1 литра воздуха взвешиванием. Колба может быть закрыта при помощи крана.

Первое взвешивание. Колба с открытым краном, следовательно, определяется вес колбы и содержащегося в ней воздуха. Затем колба откачивается.

Второе взвешивание. Колба с закрытым краном, следовательно, без воздуха.

Кран открывается под водой, и колба наполняется водою.

Третье взвешивание. Колба с водой.

Разность первого и второго взвешиваний дает вес воздуха; разность третьего и второго взвешиваний дает вес воды, то есть объем,

$$\gamma=\frac{G}{V}.$$

1 литр воздуха весит . . . . 1,293 понда,
1 литр водорода весит . . . . 0,090 понда.

Атмосферный воздух в 14,36 раза тяжелее водорода. Плотности газов обычно выражают относительными числами (по отношению к воде или воздуху).

Относительные плотности газов

Газ	Плотность относительно		Газ	Плотность относительно	
	воды	воздуха		воды	воздуха
Воздух	0,001293	1	Азот	0,001251	0,967
Водород	0,000090	0,0695	Углекислота	0,001977	1,529
Кислород	0,001429	1,106			

Закон Авогадро. Равные объемы двух газов при одинаковом давлении и одинаковой температуре содержат одинаковое число молекул.

Молем называется масса вещества, весящая столько пондов, скольким единицам равен молекулярный вес.

1 моль водорода весит 2 понда; 1 моль воды (H_2O) весит $2 + 16 = 18$ пондов; 1 моль H_2SO_4 весит $2 + 32 + 64 = 98$ пондов.

1 моль газа занимает при 0° и нормальном давлении объем, равный 22 410 *см*³.

1 *см*³ газа содержит при нормальных условиях $27 \cdot 10^{18}$ молекул. 1 моль содержит $22\,410 \times 27 \cdot 10^{18} = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ молекул — число Авогадро.

1 атом водорода имеет массу $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ *г*.

б) Давление газа

Газы обладают объемной упругостью, они сопротивляются сжатию и имеют тенденцию самопроизвольно расширяться.

Основной опыт. Водолазный колокол (рис. 101), духовое ружье, автомобильные шины.

Передача давления в газах происходит во все стороны.

Доказательство атмосферного давления воздуха при помощи барометрической трубки (рис. 102). Пространство над столбиком ртути воздуха не содержит (пустота Торичелли). Это доказывается переворачиванием трубки (металлический звук при ударе ртути о дно трубки). Если бы в верхней части трубки имелся воздух, то при перевертывании трубки он образовал бы воздушную подушку и тормозил падение ртути.

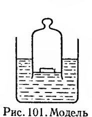


Рис. 101. Модель водолазного колокола.



Рис. 102. Демонстрация атмосферного давления.

Измерение атмосферного давления

Ртутный столбик вышиной 76 *см* и сечением 1 $см^2$ при 0° весит 76 · 13,6 = 1033 *г*.

Это давление называется *физической атмосферой.*

Давление в 1 $кг/см^2$ называется *технической атмосферой* (1 *ат*). 1 *атм* = 981 000 $дн/см^2$ и соответствует 735,6 *мм* рт. ст. (при 0°). 1 *мм* рт. ст. соответствует 1333,2 $дин/см^2$ и называется 1 торр, в память *Торичелли.*

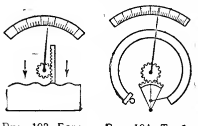


Рис. 103. Барометр — анероид.

Рис. 104. Трубка Бурдона.

Давление 1 $дн/см^2$ = 1 *бар.*

Для измерения атмосферного давления служат барометры.

1. *Ртутный барометр.* Чашечный барометр и сифонный барометр.

2. *Барометр-анероид* (рис. 103). Атмосферное давление сжимает откачанную коробку с упругой крышкой. Анероид градуируется по ртутному барометру.

3. *Трубка Бурдона* (рис. 104). Представляет собой откачанную кольцеобразную трубку с эллиптическим сечением; один конец ее закреплен. Трубка изгибается при увеличении давления.

Барометры применяют также для измерения разности высот. Пусть давление воздуха в начальной точке равно p_0. При подъеме на 10 *м* давление падает примерно на 1 *мм* рт. ст., то есть $p_1 = p_0\ 759/760$. При подъеме на следующие 10 *м* давление $p_2 = p_1\ 759/760 = (759/760)^2\ p_0$. Следовательно,

$$p_h = (759/760)^h = k^h,$$

где для сокращения принято $759/760 = k$, а показатель степени h равен разности высот, разделенной на 10 *м*.

Если место A имеет высоту h_1 *м*, место B — высоту h_2 *м*, то

$$p_1 = k^{h_1}, \quad p_2 = k^{h_2}, \quad \lg p_1 = h_1 \lg k, \quad \lg p_2 = h_2 \lg k,$$

$$H = h_2 - h_1 = \frac{1}{\lg k}(\lg p_2 - \lg p_1) = -\frac{1}{\lg k}(\lg p_1 - \lg p_2).$$

Приведенные выше расчеты со ступенями высоты в 10 *м* каждая дают для $-\frac{1}{\lg k}$ значение 1754, поэтому

$$H = 17\,540\,(\lg p_1 - \lg p_2)\ м.$$

Точное вычисление при помощи интегрального исчисления дает:

Барометрическая формула: $H = 18\,400\,(\lg p_1 - \lg p_2)\ м.$

Формула верна для постоянной температуры. Но с высотой температура понижается в среднем на 0,5 градуса на каждые 100 *м*. Поэтому давление падает быстрее.

Показания барометра при понижении температуры на 0,5° на каждые 100 *м*.

Высота . .	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000 *м*
Давление .	762	671	590	517	453	395	344	288	258 *мм* рт. ст.

Измерение давления газа

Для измерения давления газов служат *манометры*. Они показывают избыток (или недостаток) давления относительно атмосферного давления.



Рис. 105. Закрытый манометр.

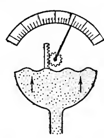


Рис. 106. Пружинный манометр.

1. Открытый манометр для измерения малых давлений.
2. Закрытый манометр для измерения больших давлений. Верхняя часть закрытого колена заполнена воздухом (рис. 105).
3. Пружинный манометр (рис. 106).

в) Воздушные насосы

Нагнетательные насосы. Велосипедный насос представляет собой герметически закрытый цилиндр с поршнем. Последний имеет односторонне открывающийся клапан.

Рис. 107. Поршневой воздушный насос.

Автоматически действующие нагнетательные насосы называются компрессорами. Они отличаются от газовых моторов только отсутствием зажигания. Первый такт: всасывание. Второй такт: сжатие и выталкивание сжатого воздуха (ср. стр. 14).

Откачивающие насосы. Насос Герике (1650 г.). Поршневой насос с двухходовым краном (рис. 107). Объем откачиваемого сосуда R, насоса S. Разряжение после n-го качания:

$$V = \frac{p_n}{p_0} = \left(\frac{R}{R+S}\right)^n.$$

При вытягивании поршня кран ставится так, чтобы сосуд и цилиндр насоса были соединены. Поворачивая кран, отсоединяют сосуд от цилиндра и соединяют последний с внешней атмосферой.

Вакуумный вращающийся насос Геде (рис. 108).

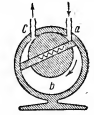


Рис. 108. Вращающийся насос.

Лопатки, прижимаемые пружиной к внутренним стенкам цилиндра, отделяют пространство a от пространства b. В пространстве a при вращении возникает разряжение, в b — сжатие. Сжатый воздух через насадку C выталкивается наружу.

Водоструйный насос (для разряжений до 60 *мм* рт. ст. — см. I. 2-б). Опыты с воздушным насосом. Магдебургские полушария показывают большую величину воздушного давления.

Бароскоп доказывает существование подъемной силы в воздухе. На весах подвешен с одной стороны стеклянный шар, с другой — маленький по объему груз. В воздухе весы находятся в равновесии. Под колоколом воздушного насоса стеклянный шар по мере откачки воз-

духа все больше перевешивает. Равновесие в воздухе обусловлено тем, что большой стеклянный шар испытывает бо́льшую подъемную силу, чем маленький грузик. Ньютонова труба подтверждает закон: в безвоздушном пространстве все тела падают одинаково быстро.

г) Действия атмосферного давления

Сифон (рис. 109). В сифоне действует разность атмосферных давлений на уровне жидкости в сосуде и на выходе из изогнутой трубки. Избыток давления в высшей точке сифона [1]:

$$(p_0 - h_2\gamma) - (p_0 - h_1\gamma) = (h_1 - h_2)\gamma.$$

Пипетка — втягивание жидкости в трубку при разряжении воздуха в ней; выталкивание жидкости при сжатии находящегося над ней в трубке воздуха.

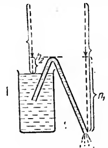


Рис. 109. Сифон.

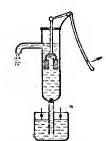


Рис. 110. Всасывающий насос.

Водяные насосы. Во всасывающем насосе (рис. 110) поршень просверлен и в него вставлен клапан. При опускании поршня нижний клапан закрывается, а клапан поршня открывается. Вода поднимается в верхнюю часть цилиндра. При поднятии поршня верхний клапан закрывается, а нижний клапан открывается и вода заполняет увеличивающийся объем цилиндра.

[1]) Не меньшую роль играют силы сцепления между молекулами жидкости, без коих сифон вообще не мог бы работать. *(Прим. ред.)*

В нагнетательном насосе (рис. 111) поршень сплошной. Клапаны находятся в дне цилиндра и в насадке (боковой трубке). При подъеме поршня открывается донный клапан, а выпускной клапан закрывается. При опускании поршня донный клапан закрывается, а выпускной — открывается. Вода выталкивается из цилиндра благодаря увеличению давления.

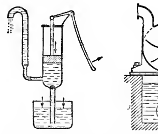


Рис. 111. Нагнетательный насос.

Рис. 112. Центробежный насос.

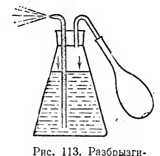


Рис. 113. Разбрызгиватель.

В центробежных насосах (рис. 112) вращательное движение лопаток колеса создает силы, заставляющие воду подниматься по подающей трубе.

Геронов шар и разбрызгиватель (рис. 113). Избыток давления воздуха, нагнетаемого в колбу, выталкивает жидкость в выходную трубку.

Подъемная сила в воздухе. Всякое тело, находящееся в воздухе, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесняемый им воздух.

Приведение взвешивания к пустоте. Пусть G — истинный вес тела, F — подъемная сила, действующая на него в воздухе, G_1 — истинный вес разновесок, F_1 — испытываемая ими подъемная сила. Из равновесия в воздухе следует:

$$G - F = G_1 - F_1; \quad G = G_1 + F - F_1.$$

Прежде чем делать приведение, следует определить объем тела и объем разновесок.

Применение подъемной силы воздуха: воздушный шар.

2. ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

а) Закон Бернулли

Жидкости (и в известных условиях также газы) подчиняются одному и тому же закону течения. Создание воздушного потока в некотором канале: фён — электрический аппарат, дающий струю теплого воздуха. Пусть при стационарном потоке S_1 — сечение в некотором месте горизонтальной трубы, v_1 — существующая там скорость потока, p_1 — давление. В другом месте трубы соответствующие величины назовем S_2, v_2, p_2. Если $S_2 < S_1$, то между S_1 и S_2 создается избыточное давление:

$$\text{Сила } F = p_1 S_1 - p_2 S_2 = (p_1 - p_2) S_{\text{ср}},$$

если сужение поперечного сечения происходит равномерно. Работа, совершенная силой F, равна:

$$A = Fl = (p_1 - p_2) S_{\text{ср}} l = V(p_1 - p_2),$$

где l — расстояние между сечениями, V — объем.

Эта работа идет на увеличение кинетической энергии

$$A = \frac{m}{2} v_2^2 - \frac{m}{2} v_1^2,$$

следовательно,

$$V(p_1 - p_2) = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2); \quad p_1 - p_2 =$$

$$= \frac{m}{2V}(v_2^2 - v_1^2) = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2);$$

$$\boxed{p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2};}$$

p_1 и p_2 обозначают статические давления в сечениях S_1 и S_2. Величина $\rho \frac{v^2}{2}$ называется динамическим давлением.

Закон Бернулли. При стационарном течении идеальной жидкости сумма статического и динамического давлений (кинетической энергии, отнесенной к единице объема) постоянна.

При увеличении скорости статическое давление уменьшается, а при уменьшении скорости — увеличивается.

Для измерения скорости потока в трубах служит *трубка Вентури* (рис. 114).

$$S_1 v_1 = S_2 v_2; \quad v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2;$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) = \frac{\rho}{2}\left[v_2^2 - \left(\frac{S_2 v_2}{S_1}\right)^2\right];$$

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(S_1^2 - S_2^2)} S_1^2.$$

Для измерения динамического давления применяется *трубка Пито* (рис. 115). Она измеряет разность давлений в точках A и B.

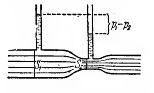


Рис. 114. Трубка Вентури.

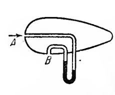


Рис. 115. Трубка Пито.



Рис. 116. Аэродинамический парадокс.

Перед отверстием A скорость уменьшается до значения *

$$v_2 = 0; \quad p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} v_1^2.$$

Избыток давления: $p_2 - p_1 = \frac{1}{2} v_1^2 \rho; \quad v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}$.

Применение закона Бернулли.

Аэродинамический парадокс (рис. 116). Притягивание подвижного диска при продувании воздуха. В месте выхода воздушной струи из узкой трубки возникает подсасывание. На этом принципе основан пульверизатор. Взаимное притягивание двух крыльев в воздушном потоке. Сужение воздушного потока между пластинками (рис. 117) создает уменьшение статического давления, благодаря чему пластинки притягиваются.

* Показать что для того чтобы график давления спадал равномерно к уровню выхода, достаточно придать контуре KLCH форму гиперболы; заметить что парадокс вызван пониженным давлением в точке L.

Парение шара в наклонном потоке (рис. 118). При сжатии воздушного потока возникает понижение давления S

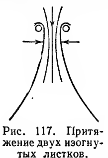


Рис. 117. Притяжение двух изогнутых листков.

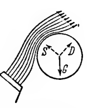


Рис. 118. Шар в потоке воздуха.

(см. рис. 114). Скольжение потока по шару создает тангенциальную силу D. Обе силы уравновешивают силу веса шара.

б) Молекулярные свойства газов

Закон Дальтона. Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений его частей (см. III.4-д).

Смешение двух газов называется *диффузией*; смешение двух газов, происходящее через пористую перегородку, не пропускающую одного из них, называется *осмосом*.

Основной опыт (рис. 119). Светильный газ диффундирует через стенки глиняного сосуда быстрее, чем воздух. Поэтому давление в сосуде возрастает, и через воду проходят газовые пузыри, доказывающие, что светильный газ проникал внутрь сосуда. Осмотическое давление подобно давлению газа.

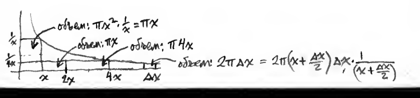
Светильный газ

Рис. 119. Диффузия.

Закон Вант-Гоффа. Моль любого вещества при растворении в воде создает одно и то же осмотическое давление.

Вещество в растворенном состоянии оказывает в некотором объеме такое же давление, какое оно оказывало бы в этом пространстве, находясь в газообразном состоянии.

О кинетической теории газов см. главу IV, раздел $Б$. 1.



II. КОЛЕБАНИЯ, ВОЛНЫ И АКУСТИКА

1. УПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

а) Гармонические колебания

Упругие тела, выведенные из положения равновесия, совершают гармонические колебания. Гармоническое колебание можно рассматривать как проекцию кругового движения и описывать при помощи последнего, так как и при круговом движении сила, действующая в направлении какого-либо диаметра, пропорциональна отклонению от положения равновесия.

Пусть радиус вспомогательного круга равен a, он соответствует наибольшему отклонению от положения равновесия: a — *амплитуда*. Мгновенное положение определяется ординатой $y = a \sin \varphi$ (рис. 120).

Рис. 120. Гармоническое колебание нагруженной спиральной пружины.

Мгновенное отклонение от положения равновесия называют смещением (элонгацией). Угол φ, образуемый радиусом-вектором, проведенным к точке на окружности, с осью абсцисс, называют *фазовым углом*. Время, протекшее от начала колебания, обозначим через t, время одного оборота точки по окружности T называют *периодом колебания*.

Число колебаний в секунду $f = 1/T$ называется частотой, она измеряется в герцах (*гц*)

$$\varphi : 2\pi = t : T,$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t;$$

угловая скорость $\omega = \frac{v}{r} = \frac{2\pi r}{T} : r = 2\pi f$, $\varphi = \omega t$, $\omega = 2\pi f$ называется также угловой частотой.

1 герц = 1 колебанию в секунду.
1 килогерц (*кгц*) = 1000 *гц*.

Период и частота — обратные величины:

$$f = \frac{1}{T}.$$

$y = a \sin \frac{2\pi}{T} t = a \sin \omega t$ — смещение при синусоидальном колебании.

б) Синусоидальная волна

Рассмотрим гармоническое колебание светящейся точки, проектируемое на экран при помощи равномерно вращающегося зеркала [1]). Колебание будет разложено в волновую

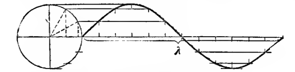


Рис. 121. Синусоидальное колебание.

линию. Изображением гармонического колебания является синусоида. *Расстояние между двумя точками, находящимися в одинаковом колебательном состоянии, называется длиной волны* (рис. 121).

Длина волны λ соответствует одному периоду T.

Такая же форма синусоидального колебания получается в том случае, когда отдельные частицы упругой среды

[1]) При этом абсциссы отдельных точек растут пропорционально времени. (*Прим. ред.*)

выводятся из их положений равновесия. Эти частицы влияют на соседние и также приводят их в колебание. Но колебания каждой последующей частицы начинаются несколько позже. Эти частицы в свою очередь влияют на своих соседок, и так далее. Частица, находящаяся на расстоянии x от места первого возбуждения, начинает колебаться на t' *сек* позже. Ее смещение описывается уравнением

$$y = a \sin 2\pi \frac{t-t'}{T} = a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right),$$

так как

$$t' : T = x : \lambda.$$

В упругой среде колебание распространяется в виде волны с определенной скоростью c; за время T оно распространится на отрезок λ. Следовательно,

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

или

$c = \lambda f$ — основное уравнение учения о волнах.

При волновом процессе каждая частица колеблется около своего положения равновесия, а форма волны распространяется в среде (сравни с колосьями при ветре). Волна,

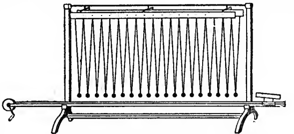


Рис. 122. Волновая машина.

гребни и впадины которой перемещаются в среде, называется *бегущей волной*. Для демонстрации волнового движения служит *волновая машина* (рис. 122). Ряд бифилярно подвешенных маятников может колебаться перпендикулярно к оси ряда. Если последовательно выводить маятники из

положений равновесия (что достигается равномерным движением наклонной пластинки, показанной в правой части рисунка), то создается модель бегущей волны. Волну, распространяющуюся по прямой линии, можно назвать линейной волной, в противовес круговой волне, распространяющейся от места возбуждения по радиусам во всех направлениях.

В поперечной волне частицы колеблются *перпендикулярно к направлению распространения волны.*

Перемещая планки, к которым подвешены маятники (рис. 122), можно повернуть их плоскость колебаний на 90°; тогда маятники колеблются в направлении оси ряда.

В продольной волне частицы колеблются взад-вперед в направлении распространения волны.

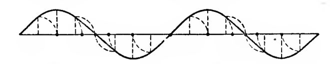


Рис. 123. Преобразование поперечной волны в продольную.

В продольной волне возникает последовательность сжатий и разряжений, распространяющихся подобно гребням и впадинам поперечной волны.

Поперечная волна переходит в продольную при повороте смещений каждой точки на 90°.

На рис. 123 изображена поперечная волна и ординаты отдельных точек, запаздывающих друг относительно друга по фазе на 45°. Если все ординаты повернуть около их оснований на 90° по стрелке часов, то конечные точки их покажут расположение точек в продольной волне.

Поперечные волны легко получить на шнуре, закрепленном с одного конца. Электрические и световые волны также являются поперечными.

Продольные волны можно получить на длинной спиральной пружине. Звуковые волны также являются продольными.

Волны на поверхности воды (они не являются чисто упругими волнами) имеют сложный характер. Поверхност-

ные частицы движутся по окружностям (рис. 124); возникающая при этом деформация напоминает поперечную волну. Частицы, лежащие глубже, испытывая давление со стороны вышележащих, движутся по эллипсам. Но в жидкости можно создать и чисто упругие продольные волны (см. нижнюю часть рисунка).

Рис. 124. Колебания частиц в водяной волне.

в) Наложение волн, отражение

По закону независимости движений смещения складываются как векторы.

На рис. 125 показано наложение двух волн. Длина волны u вдвое больше, чем v. Результирующая волна Z получается векторным суммированием обоих смещений. Она уже не является синусоидальной волной.

Рис. 125. Наложение двух волн.

Интерференция волн. Две волны одинаковой частоты и одинаковой фазы дают результирующую волну той же частоты, но удвоенной амплитуды (рис. 126).

Две волны равной частоты, имеющие разность фаз π (разность хода $\lambda/2$), гасят друг друга, если их амплитуды одинаковы (рис. 127).

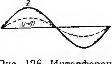


Рис. 126. Интерференция волн равной длины. Нулевая разность фаз.

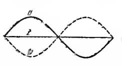


Рис. 127. Интерференция волн равной длины. Сдвиг фаз 180°.

Биения. Две волны, имеющие слегка отличающиеся частоты, дают усиление, пока разность фаз невелика. По мере нарастания разности фаз результирующее смещение все уменьшается, но затем снова начинает возрастать по мере приближения разности фаз к 2π. Эти чередующиеся нара-

стания и убывания амплитуды называют биениями (рис. 128).

Частота биений равна разности частот.



Рис. 128. Возникновение биений.

Отражение. Бегущая волна отражается от неподвижной стены (рис. 129) по законам упругого удара (см. I. А. 3-е). Гребень превращается во впадину, и наоборот.

Отражение от неподвижной стены происходит с потерей полуволны.

Если же отражение происходит от менее плотной среды, например от воздуха, граничащего с водой (волна распространяется в воде), то на такой границе частицы могут

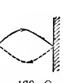


Рис. 129. Отражение от «более плотной» среды.

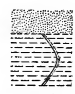


Рис. 130. Отражение от «менее плотной» среды.

колебаться свободно. Поэтому гребень при отражении остается гребнем, впадина — впадиной (рис. 130).

Отражение от менее плотной среды происходит без потери полуволны.

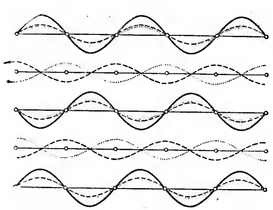


Рис. 131. Возникновение стоячей волны.

В обоих случаях возникает интерференция падающей и отраженной волн, при этом получаются стоячие волны, изображенные на рис. 131.

г) Стоячие волны

Свойства стоячих волн

1. Они возникают при интерференции бегущей и отраженной волн, имеющих в точке отражения одинаковые или противоположные фазы, одинаковую длину волны, но взаимно-противоположные направления распространения.

2. Все частицы в стоячей волне одновременно проходят через положения равновесия.

3. Каждая частица имеет свою амплитуду колебаний.

4. Определенные участки — *узлы смещения* — находятся постоянно в покое. Расстояние между двумя соседними узлами равно половине длины волны.

5. Посредине между узлами находятся участки наиболее интенсивного движения — *пучности смещения.*

6. При отражении от более плотной среды (неподвижной стены) в месте отражения возникает узел смещения.

7. При отражении от менее плотной среды в месте отражения образуется пучность смещения; первый узел смещения отстоит от места отражения на четверть длины волны.

Опыт Мельде с камертоном (рис. 132) позволяет получить стоячие волны. К концу ножки камертона привязана нить, натягиваемая небольшим грузиком, прикрепленным к другому концу нити. Колебания камертона возбуждают в нити бегущую волну. Она отражается от конца нити и интерферирует с бегущей волной. Возникает стоячая волна. Положения узлов и пучностей неизменны во времени. Меняя натяжение нити, можно менять скорость распространения волны, следовательно ее длину и тем самым число узлов и пучностей, укладывающихся на нити.

Рис. 132. Опыт Мельде с камертоном.

2. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ НА ПЛОСКОСТИ И В ПРОСТРАНСТВЕ

а) Колебания на плоскости

При сложении двух взаимно-перпендикулярных колебаний одинаковой частоты и равной амплитуды получается суммарное плоское движение, происходящее (в зависимости от разности фаз) по окружности или по эллипсу. Построение результирующего движения осуществляется при помощи вспомогательной окружности. Проектируя точку, равномерно движущуюся по вспомогательной окружности, на соответствующий диаметр, получаем гармоническое колебание. На рис. 133 изображены только внешние половины вспомогательных окружностей.

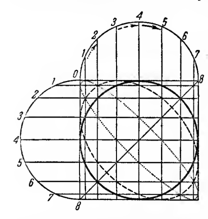


Рис. 133. Сложение двух взаимно-перпендикулярных гармонических колебаний.

При разности фаз, равной 0 или π, результирующее движение происходит по одной из диагоналей квадрата, при разности фаз $\frac{\pi}{2}$ — по окружности, при других разностях

фаз — по эллипсам различной формы и различно расположенным внутри квадрата. Точки траектории результирующего движения получаются при пересечении соответствующих вертикальных и горизонтальных отрезков, определяемых обоими слагаемыми движениями.

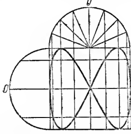


Рис. 134. Фигура Лиссажу.

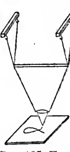


Рис. 135. Песочный маятник.

При неравенстве частот складываемых взаимно-перпендикулярных колебаний возникают более сложные траектории, называемые *фигурами Лиссажу*. На рис. 134 показан результат сложения двух взаимно-перпендикулярных колебаний, периоды которых относятся, как 1 : 2, амплитуды одинаковы и начальная разность фаз равна нулю.

Механическое построение фигур Лиссажу осуществляется при помощи струи песка, выходящей из сосуда, участвующего в двух взаимно-перпендикулярных колебаниях (рис. 135).

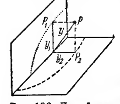


Рис. 136. Линейные волны во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

б) Линейные волны во взаимно-перпендикулярных плоскостях

Линейные волны, распространяющиеся в двух различных плоскостях, могут быть сведены в одну волну путем векторного суммирования смещений (рис. 136).

Если обе плоскости взаимно-перпендикулярны, то при разности фаз, равной нулю, получается суммарная линейная волна, расположенная в диагональной плоскости. При разности фаз $\frac{\pi}{2}$ (частоты и амплитуды одинаковы!)

получается циркулярная волна (винтовая линия на круговом цилиндре), при других разностях фаз получается винтовая линия на эллиптическом цилиндре.

в) Поляризация

В общем случае колебания в поперечной волне происходят не в одной плоскости, но по всевозможным направлениям, перпендикулярным к направлению распространения волны. Это хорошо заметно при получении стоячей волны

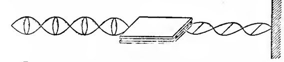


Рис. 137. Модельный опыт по поляризации.

на резиновом шнуре. Через узкую щель такие колебания полностью не проходят — сохраняются лишь колебания в плоскости щели (рис. 137). Этот процесс называется *поляризацией*, а приспособление для его реализации — *поляризатором*. В случае шнура поляризация хорошо осуществляется узкой щелью между двумя досками.

Поляризация возможна только у поперечных волн.

Сжатия и разрежения продольной волны свободно проходят через щель, продольные волны не могут быть поляризованы.

3. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

а) Основная идея

При волновом движении каждая колеблющаяся точка может рассматриваться как возбудитель колебаний в соседних точках. В однородной среде волна должна быть сферической и распространяться во все стороны с одинаковой скоростью.

Принцип Гюйгенса. Каждая возбужденная волной точка сама становится источником элементарных волн.

Огибающая элементарных волн, построенных в направлении распространяющейся волны, дает новое положение волнового фронта (рис. 138).

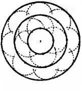


Рис. 138. К принципу Гюйгенса.

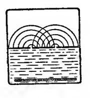


Рис. 139. Наблюдение элементарных волн в водяной ванне.

Демонстрация в водяной ванне. Плоская ванна (рис. 139) наполняется водой и делится поперечной стенкой на две части. В стенке делается несколько узких отверстий. При ритмичном колебании линейки, расположенной параллельно стенке, создается плоский волновой фронт. Во вторую часть сосуда проходят через отверстия круговые волны (элементарные волны Гюйгенса).

б) Отражение

Падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости. Угол падения равен углу отражения.

Обоснование (рис. 140).

$$C_1C = AA_1 = AD = r;$$

$$\Delta ACD = \Delta AC_1C;$$

$$\angle \alpha = \angle C_1AC =$$

$$= \angle ACD = \angle \beta.$$

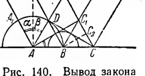


Рис. 140. Вывод закона отражения по Гюйгенсу.

Угол падения α = углу отражения β.

в) Преломление

Падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скоростей распространения волны в обеих средах c_1 и c_2.

Это отношение называется показателем преломления n.

Обоснование. Пока волна в первой среде распространяется от C_1 до C (рис. 141), элементарная волна от точки A распространяется до точки D. Из чертежа видно, что

$$c_1 = AC\sin\alpha; \quad c_2 = AC\sin\beta,$$

поэтому

$$\sin\alpha : \sin\beta = c_1 : c_2 = n.$$



Рис.141. Вывод закона преломления по Гюйгенсу.

n является постоянной величиной (для данной длины волны).

Закон преломления: $\sin\alpha : \sin\beta = c_1 : c_2 = n$.

Теорема Ферма. Распространение волны между двумя точками происходит таким образом, что луч проходит из начальной точки в конечную за наименьшее возможное время. Например, если точки расположены в разных средах на равном расстоянии от плоской границы сред, то большая часть пути луча проходит в среде с большей скоростью распространения.

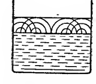


Рис. 142. Волны огибают препятствие.

г) Дифракция (загибание волны)

Волны огибают препятствие (рис. 142). Это можно показать в водяной ванне. Плоская волна возбуждает у краев препятствия элементарные волны, сходящиеся позади препятствия. Таким образом, волна проникает в область геометрической тени. Это явление называется *дифракцией*.

Для звука это явление наблюдается повседневно; дифракцию света безуспешно искали в течение ряда лет; в конце концов она была обнаружена.

Отражение, преломление и дифракция суть изменения в условиях распространения волн, объясняемые принципом Гюйгенса.

4. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ОТ СВОЙСТВ СРЕДЫ

а) Твердые тела

Скорость распространения волны зависит от упругих свойств среды, в которой происходит распространение. Для продольных волн в твердых телах согласно *Ньютону*

$$c=\sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

здесь E — модуль сжатия (в $дн/см^2$), ρ — плотность (в $г/см^3$).

б) Газы

В газах изменения давления происходят адиабатически (см. III. 6), поэтому скорость распространения зависит от отношения теплоемкостей газов $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$.

Формула Лапласа:

$$c=\sqrt{\frac{\varkappa p}{\rho}}, \quad \varkappa=\frac{c_p}{c_v}.$$

Здесь p — давление (в $дн/см^2$), ρ — плотность (в $г/см^3$).

5. ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА

а) Источники звука

Источником звука может служить любое тело, способное совершать упругие колебания: металлическая пластинка (гонг, литавры), струна, стержень (ударник часов, ножки камертона), столб воздуха (в трубах).

Звук может распространяться только в упругой среде.

Опыт. Электрический звонок помещается под колокол воздушного насоса; по мере откачки воздуха звук делается все слабее и слабее.

Звуковые волны суть продольные волны.

Звуковые волны возникают благодаря образованию сгущений и разрежений в среде, окружающей источник звука. Они распространяются в среде и, достигая уха, возбуждают в нем колебания, воспринимаемые нами как звук.

б) Обнаружение звуковых волн

При отражении получаются стоячие звуковые волны; их можно сделать видимыми.

1. *Пыльные фигуры Кундта* (рис. 143). Стеклянный стержень входит в стеклянную трубку, закрытую с одного конца.

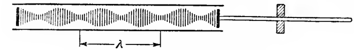


Рис. 143. Пыльные фигуры Кундта.

При помощи натирания вдоль его оси он приводится в продольные колебания, колебания передаются воздушному столбу в трубке и отражаются от закрытого конца. Мелкий пробковый порошок разбрасывается из пучностей смещения и остается неподвижным в узлах. Измеряя расстояние между узлами, можно определить длину волны.

2. *Лампа с накаленной нитью.* В узлах движения, где частицы воздуха не колеблются, проволока остается накаленной; в пучностях благодаря интенсивному движению частиц воздуха она охлаждается, и на проволоке появляются темные места. Подобная лампа может быть использована для обнаружения ультразвуковых волн.

в) Скорость звука

Скорость звука в воздухе была измерена *Гумбольдтом* в 1822 г., *Араго* в 1832 г.; она зависит от температуры.

$$c = 331{,}3\sqrt{1 + \alpha t}\ \text{м/сек}.$$

Здесь α — коэффициент расширения газа (1/273), t — температура в градусах Цельсия.

В воздухе при 15° $\boxed{c \approx 340\ \text{м/сек}.}$

Скорость звука в воде была измерена *Колладоном* и *Штурмом* на Женевском озере при 8° С и оказалась равной 1435 *м/сек.*

Скорость звука в воде	$c_в = 1450$ *м/сек.*

Скорость звука в твердых телах еще больше; так в железе она близка к 5000 *м/сек.*

Скорость звука в газах может определяться по пыльным фигурам Кундта. Стоячие волны в трубке Кундта можно возбуждать зуммером известной частоты. Трубку наполняют исследуемым газом и измеряют среднее расстояние между узлами.

Значение скорости звука в м/сек

Углекислота	260	Морская вода	1475
Воздух	340	Каучук	35
Водяной пар	410	Латунь	3400
Светильный газ	490	Дерево	около 4000
Водород	1270	Железо	около 5000
Вода	1450	Стекло	около 5200

6. ВЫСОТА ТОНА И ИСТОЧНИКИ ЧИСТЫХ ТОНОВ

а) Частота и интервал

Человеческое ухо воспринимает звуковые волны с частотами от 16 до 20 000 *гц*. Частота 16 *гц* соответствует нижней границе слышимости; верхняя граница несколько меняется, понижаясь к старости. Упругие волны с частотой ниже 16 *гц* называют инфразвуком; к ним относятся колебания земной коры при землетрясениях.

Волны с частотой, превышающей 20 000 *гц*, называют *ультразвуковыми*.

Простейший способ возбуждения ультразвука: высокочастотные электрические колебания приводят в упругие колебания пластинку Q пьезокварца, погруженную в парафиновое масло. Исследуемые объекты помещаются в стеклянной трубке, погруженной в масло (рис. 144).

Таким способом легко получаются частоты от 100 до 700 тысяч *гц*.

Применения ультразвука. Обезгаживание жидкостей, изготовление эмульсий, исследование материалов, раздражение мускульных тканей.

В музыке применяются следующие частоты:

от 16,4 до 8372 *гц* (в органе),
от 27,5 до 3520 *гц* (в фортепиано).

В музыке интервалом называется определенное целочисленное соотношение двух частот. Чем меньше эти целые числа, тем приятнее звуковое восприятие.

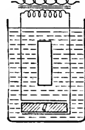


Рис. 144. Возникновение ультразвуковых волн.

Рис. 145. Сирена.

Простейшие интервалы: октава — 1 : 2; квинта 2 : 3; кварта 3 : 4; большая терция 4 : 5; малая терция 5 : 6.

Числа колебаний (частоты) могут задаваться сиреной (рис. 145). Ток воздуха ритмично прерывается диском с отверстиями. За диском возникают сгущения и разрежения, дающие ощущение тона.

б) Музыкальные гаммы

Диатоническая гамма

Прима	Секунда	Терция	Кварта	Квинта	Секста	Септима	Октава	
c	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c*	
1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1	Интервалы
	9:8	10:9	16:15	9:8	10:9	9:8	16:15	Частные интервалы

Интервал 9 : 8 называют большим целым тоном, интервал 10 : 9 — малым целым тоном, 16 : 15 — полутоном.

Два полутона примерно соответствуют одному целому тону:

$$\frac{16}{15}\cdot\frac{16}{15}=\frac{256}{225}\approx\frac{9}{8}.$$

Хроматическая гамма получается путем деления каждого тона на два полутона. Это осуществляется, начиная с низких тонов, причем получаются полутоны:

cis, dis, fis, gis, ais.

Если же деление производится от высоких тонов, то полутоны называются:

des, es, ges, as, b.

Хроматическая гамма оказывается неподходящей для инструментов с постоянной настройкой (фортепиано). Здесь со времен *Баха* применяют *равномерную настройку*: все 12 частичных интервалов делаются равными $\sqrt[12]{2}=1{,}059$. Задаются только октавы.

Основным тоном для настройки музыкальных инструментов считается

Тон a' камертона $= 440$ *гц*.

Частоты и длины волн (в воздухе при 15° C)

Нижняя граница слышимости	16 *гц*	2100 *см*
Нижний тон фортепиано	27,5 »	1230 »
Стандартный тон камертона	440 »	77,4 »
Высший тон фортепиано	3520 »	9,7 »
Верхний предел слышимости	20 000 »	1,7 »

Здесь использовано соотношение $c = f\lambda$.

в) Источники звука

Тоны одинаковой частоты, издаваемые различными инструментами, звучат различно. *Тембр звука* определяется числом и силой обертонов, излучаемых одновременно с основным тоном. Обертоны во многих случаях имеют частоты, являющиеся целыми, кратными основной частоты.

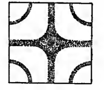
Стержни могут приводиться как в поперечные, так и в продольные колебания, но излучаемые при этом

звуковые волны всегда продольны. При колебаниях камертона на конце ножек, так же как и в середине, где он соединен с грифом, возникает пучность движения (рис. 146).

В колеблющихся пластинах создаются неподвижные (узловые) линии; между ними располагаются пучности



Рис. 146. Колеблющийся камертон.



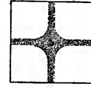


Рис. 147. Пыльные фигуры Хладни.



Рис. 148. Монохорд.

движения. Соседние участки при этом колеблются в противоположных фазах. Узловые линии можно сделать видимыми, посыпав пластинку песком, — *фигуры Хладни* (рис. 147).

Струны. Частота зависит от длины струны, ее натяжения и массы, приходящейся на единицу длины:

$$f=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{P}{m}},$$

l — длина, P — натяжение в динах, m — масса единицы длины в *г/см*. Для проверки закона колебания струн служит монохорд (рис. 148).

a б

Рис. 149. Органные трубы: *а* — открытая; *б* — закрытая.

Трубы

1. *Открытые и закрытые органные трубы* (рис. 149). В открытых органных трубах пучности движения воздуха образуются внизу, у щели, и наверху, на открытом конце. Между

ними может образоваться 1, 2, 3 и больше узлов. Поэтому длина трубы

$$l=\frac{\lambda}{2},\ \frac{2\lambda}{2},\ \frac{3\lambda}{2},\ \ldots$$

В такой трубе возникают все возможные обертоны.

В закрытой трубе у щели снова образуется пучность движения, но на закрытом конце — узел $\left(l=\frac{\lambda}{4}\right)$. Если между ними создаются дополнительные узлы, то при одном узле длина трубы равна $l=\frac{3\lambda}{4}$, при двух узлах $l=\frac{5\lambda}{4}$. Поэтому в закрытой трубе возникают только нечетные обертоны. Основной тон закрытой трубы на октаву ниже тона открытой трубы той же длины.

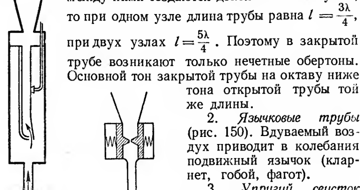


Рис. 150. Язычковая труба.

Рис. 151. Упругий свисток.

2. *Язычковые трубы* (рис. 150). Вдуваемый воздух приводит в колебания подвижный язычок (кларнет, гобой, фагот).

3. *Упругий свисток* (рис. 151). Заштрихованные стенки свистка сближаются при продувании воздуха и снова оттягиваются пружинами. К свисткам принадлежит рог — тромбон, где роль упругих стенок выполняют губы человека, продувающего воздух. Свисток поясняет работу голосовых связок.

г) Интенсивность и громкость звука

Закон Вебера — Фехнера. Когда интенсивность раздражения возрастает в геометрической прогрессии, интенсивность восприятия растет в арифметической прогрессии.

Следует отличать объективную характеристику звука — его интенсивность от субъективного ощущения громкости. При удваивании интенсивности раздражения (объективной интенсивности) громкость не кажется нам удвоившейся. Удвоение громкости ощущается лишь при достижении второй степени первоначального раздражения.

Для измерения громкости пользуются единицами, называемыми *фонами*:

$$n \text{ фонов} = 10 \lg \frac{I'}{I},$$

где I' и I — интенсивности звуков, громкость которых отличается на n фонов.

Так как интенсивности пропорциональны квадратам звукового давления, то получается:

$$n \text{ фонов} = 10 \lg \left(\frac{p'}{p}\right)^2 = 20 \lg \frac{p'}{p}.$$

Для абсолютного измерения интенсивности можно пользоваться правилом:

Тон частоты 1000 *гц*, создающий в ухе давление 1 *дн/см*², имеет громкость, равную 70 фонам (за нулевую принята громкость еле слышимого звука той же частоты).

Шкала громкостей:

Порог слышимости — 0 фонов, шопот — 20 фонов, нормальная речь — 40 фонов, средний громкоговоритель — 60 фонов, крик — 80 фонов, фортиссимо большого оркестра — 100 фонов, ощущение боли — 130 фонов (числа даны ориентировочные).

7. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И РЕЗОНАНС

а) Отражение

Эхо возникает при перпендикулярном отражении (угол падения равен нулю) звуковых лучей от отдаленного препятствия (скала, опушка леса). Ухо способно раздельно воспринять в течение секунды около 10 коротких звуков. Поэтому для возникновения эха отражающая поверхность должна быть удалена настолько, чтобы между моментом произнесения и возвращения звука прошло не менее 0,1 *сек*. Следовательно, минимальное расстояние составляет около 17 метров.

Рис. 152. Отражение звуковых волн.

Звуковые лучи подчиняются закону отражения: падающий луч образует с перпендикуляром, восставленным из точки падения, такой же угол, что и отраженный луч.

Опыт. Карманные часы кладутся на дно вертикального цилиндра (рис. 152); отражение звука в желаемом

направлении осуществляется наклонно расположенной стеклянной пластинкой.

б) Явление интерференции

При наложении двух близких по частоте тонов возникают биения (рис. 153).

Звуковые волны при разности хода в половину длины волны гасят друг друга.

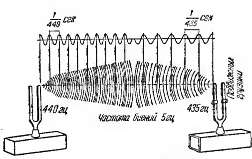


Рис. 153. Биения колебаний двух камертонов.

Доказательство при помощи трубки Квинке (рис. 154). Зуммер создает тон определенной частоты; звуковые волны распространяются двумя путями (по коленам трубки),

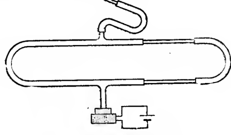


Рис. 154. Трубка Квинке.

после чего снова сходятся и дают интерференционные явления. Стеклянный наконечник резинового шланга приставляется к уху.

Звук замирает при разности путей, равной

$$\frac{\lambda}{2},\ \frac{3\lambda}{2},\ \frac{5\lambda}{2},\ \ldots$$

Наибольшая громкость получается при разности путей, равной

$$0,\ \lambda,\ 2\lambda, \ldots$$

в) Принцип Допплера

По принципу независимости движений в случае движения источника звука или наблюдателя (относительно воздуха) их скорость должна векторно складываться со скоростью звука. Если источник приближается, то ухо наблюдателя воспринимает в единицу времени большее число колебаний, высота тона повышается. При удалении источника наблюдатель воспринимает меньшее число колебаний в единицу времени, чем при неподвижном источнике. Поэтому высота тона понижается. Если же наблюдатель движется с той же скоростью, что и источник, то он воспринимает «правильную высоту» тона.

При приближении источника (скорость v) f колебаний приходят к наблюдателю с отрезка $c - v$. Так как они пришли не с отрезка c, но с более короткого отрезка $c - v$, то длина волны уменьшается, частота увеличивается $\lambda' = \lambda - \delta$. Но так как

$$c = \lambda f = \lambda' f', \quad v = \delta f,$$

то

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda - \delta} = \frac{cf}{\lambda f - \delta f} = f\frac{c}{c - v}.$$

При удалении тон кажется ниже:

$$f' = f\frac{c}{c + v}.$$

Движущийся наблюдатель. Пути наблюдателя v (в единицу времени) соответствуют $\frac{v}{\lambda} = f\,\frac{v}{c}$ колебаний. Эти колебания воспринимаются помимо тех f колебаний, которые воспринимает неподвижный наблюдатель, поэтому

$$f' = f \pm \frac{fv}{c} = f\,\frac{c \pm v}{c}.$$

г) Резонанс

Резонансом называют вынужденные колебания системы, способной совершать собственные колебания, при совпадении вынуждающей частоты с собственной.

Пример. Струна рояля при нажатой педали начинает звучать, если вблизи звучит соответствующий тон.

Воздушный столб начинает звучать, если высота столба соответствует $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, ... длины волны возбуждающего тона.

Опыт. Камертон звучит над передвижной трубкой, один конец которой опущен в воду (рис. 155). Когда длина воздушного столба в трубке составит $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{3\lambda}{4}$, ..., воздух приходит в интенсивные колебания, благодаря чему слышимость тона возрастает.

Резонансные ящики камертонов имеют длину, равную четверти длины волны, создаваемой камертонами.

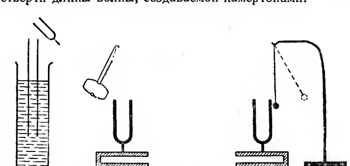


Рис. 155. Резонансный опыт.

Рис. 156. Резонанс камертонов.

Опыт. Резонанс двух одинаковых камертонов (рис. 156). Если возбудить левый камертон, то колебания передаются по воздуху правому камертону. Легкий маятник начинает отскакивать от его ножек. Если, прикоснувшись к первому камертону, заглушить его и снова освободить, то колебания будут передаваться ему от второго камертона, движение маятника станет более слабым и, наконец, прекратится, а звучание первого камертона при этом усилится.

Процесс будет повторяться, пока запас энергии камертонов не израсходуется.

Резонанс следует отличать от *вынужденных колебаний*, возникающих при несовпадении частот. Если поставить звучащий камертон на стол, то доска стола приходит в вынужденные колебания и звук усиливается. Но это объясняется простым увеличением площади колеблющейся поверхности, а не совпадением частот.

Мембраны могут колебаться на различных вынуждающих частотах; при этом стараются избежать резонанса — он должен лежать вне желаемой области частот, иначе резонансные частоты будут воспроизводиться преувеличенно громко (телефонные и микрофонные мембраны).

В технике резонансные колебания иногда опасны (колебания валов и фундаментов двигателей); но в других случаях они желательны и создаются преднамеренно (при настройке радиоприемников, а также в акустике).

III. УЧЕНИЕ О ТЕПЛОТЕ

1. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ, ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ТЕЛ

Наше восприятие тепла основывается на осязании и поэтому недостаточно надежно. Более или менее надежным ощущением мы обладаем при оценке *различий* теплового состояния. Мерой теплового состояния служит температура. Но, чтобы нагреть кусок железа до определенной температуры, мы затрачиваем значительно меньше тепла, чем для нагревания такой же массы воды до той же температуры. Вследствие этого мы должны строго отличать тепловое состояние, т. е. температуру, от затраты тепла, необходимой для достижения данной температуры.

а) Термометр и измерение температуры

Для измерения температуры служат термометры. Для определения температуры мы используем главным образом тепловое расширение жидкостей (ртутный и спиртовой термометры). Для измерения температур может быть также использовано различное тепловое расширение двух металлов, металлический термометр, см. ниже, 1-б. Можно также использовать электрическое напряжение, возникающее в месте спая двух металлов, если его нагревать, в то время как свободный конец термоэлемента поддерживается при более низкой температуре (см. V. 4-г).

Для градуировки жидкостного термометра служат две постоянные точки (основные точки): температура таяния льда, называемая точкой плавления, и температура кипения воды (точка кипения) при нормальном давлении (760 *мм* рт. ст.). Расстояние между этими двумя точками делится на сто равных частей (шкала Цельсия), на 80 равных частей (шкала Реомюра). По шкале Фаренгейта точка таяния

льда приходится на тридцать второе деление. Точка кипения воды — на двести двенадцатое деление. Следовательно, между этими точками укладывается 180 делений. Переход с одной шкалы на другую:

$$n^\circ \mathrm{C} = 0{,}8n^\circ \mathrm{R} = (1{,}8n^\circ + 32^\circ)\,\mathrm{F},$$

$$n^\circ \mathrm{R} = 1{,}25n^\circ \mathrm{C} = (2{,}25n^\circ + 32^\circ)\,\mathrm{F},$$

$$n^\circ \mathrm{F} = \frac{5}{9}(n^\circ - 32^\circ)\,\mathrm{C} = \frac{4}{9}(n^\circ - 32^\circ)\,\mathrm{R}.$$

Для температур ниже —20° С, в жидкостных термометрах применяется спирт, толуол или пентан; для температур выше 300° С применяются ртутные термометры из кварцевого стекла, заполненные азотом (пригодны до 750° С).

б) Расширение твердых тел

При нагревании твердые тела расширяются во все стороны; тела, имеющие форму стержня, расширяются заметнее всего в направлении своей длины. Линейное расширение легко измерить.

Основные опыты.

Шар и кольцо (рис. 157). При одинаковой температуре кольца и шара шар свободно проходит через кольцо. Если нагреть шар, то вследствие его расширения он застревает в кольце до тех пор, пока их температуры не сравняются.



Рис. 157. Шар и кольцо.

Стальной стержень с болтом (рис. 158). Стальной стержень просверлен с одного конца; в это отверстие вставлен болт из чугуна или толстый гвоздь. На другом конце стержня имеется нарезка и гайка. При комнатной температуре стержень крепко затягивается в подставке, после чего нагревается в средней части. Вследствие теплового линейного расширения гайку удается навинтить дальше. При охлаждении и сжатии стержня развиваются такие силы, что чугунный болт лопается.

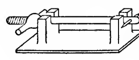


Рис. 158. Стальной стержень и болт.

Измерение линейного расширения (рис. 159). Через трубку длиной 1 *м*, сделанную из испытуемого вещества, пропускается пар. Перед опытом один конец трубки прочно закрепляется, а другой свободно лежит на опоре. Свободный конец трубки касается рычага со стрелкой (стрелка ходит вдоль шкалы), и ее начальное положение фиксируется. Протекающий пар нагревает трубку приблизительно до 100° С, она расширяется и давит на рычаг. Отсчитывается новое положение указателя. Перед опытом рычаг градуируется по известному расширению (например, на 1° приходится 0,05 *мм*).

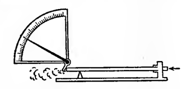


Рис. 159. Продольное удлинение трубки.

Удлинение, отнесенное к единице длины и единице прироста температуры, называется коэффициентом линейного расширения (α).

Пусть Δl обозначает прирост длины стержня, l_0 — его начальная длина при 0° С, l_t — его длина при температуре t. Тогда

$$\Delta l = l_t - l_0 = l_0 \alpha t, \quad l_t = l_0 (1 + \alpha t).$$

Обратно, $l_0 = l_t \frac{1}{1 + \alpha t} \approx l_t (1 - \alpha t)$, так как α очень мало и членами высших порядков можно пренебречь:

$$\frac{1}{1 + \alpha t} = 1 - \alpha t + \alpha^2 t^2 - \alpha^3 t^3 \ \ldots$$

Для *объемного расширения* кубика получаем:

$$\Delta V = l^3 - l_0^3,$$

но

$$l_t^3 = l_0^3 (1 + \alpha t)^3 = l_0^3 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3).$$

Так как α очень мало, то при обычно встречающихся температурах можно пренебречь обоими последними членами в скобках. Тогда

$$V_t = V_0 (1 + \beta t), \quad \beta = 3\alpha.$$

Объемный коэффициент теплового расширения β равен утроенному значению коэффициента линейного расширения.

Применения. Различное тепловое расширение металлов используется в компенсаторе часов и металлическом термометре.

Компенсационный маятник состоит из трех латунных стержней и двух цинковых, расположенных между ними (рис. 160). Удлинение латунных стержней компенсируется удлинением цинковых стержней, происходящим в противоположном направлении.

Металлический термометр имеет спираль, сделанную из двух полос различных металлов, сваренных друг с другом (рис. 161). Один из этих металлов расширяется при нагревании сильнее, чем другой. Вследствие одностороннего расширения спираль развертывается, причем указатель перемещается вправо. При охлаждении спираль снова скручивается и указатель отходит влево. Шкала градуируется по известным температурам.

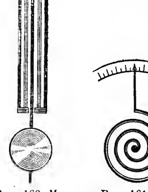


Рис. 160. Маятник с температурной компенсацией.

Рис. 161. Металлический термометр.

В технике также приходится считаться с тепловым расширением: рельсовые стыки, мостовые опоры, ввод тока в лампах накаливания, железобетон (железо и бетон имеют одинаковые коэффициенты расширения), расширение электрических проводов при нагревании их током.

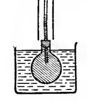


Рис. 162. Тепловое расширение жидкости.

в) Расширение жидких тел

Основной опыт (рис. 162). Стеклянная колба наполняется подкрашенной жидкостью. Через пробку пропущена стеклянная трубка. При комнатной температуре уровень жидкости на несколько миллиметров выше пробки. Если колбу поместить в

водяную баню более высокой температуры, то жидкость в трубочке поднимется; это показывает, что коэффициент расширения жидкости больше коэффициента расширения стекла.

Измерения. Трубка изогнута под прямым углом (рис. 163) и перед опытом заполняется жидкостью. Вытекающая при нагревании жидкость собирается в мерный цилиндр и определяет прирост объема ΔV. Начальный объем жидкости V_1 определяется предварительно. Измерение дает разность расширений жидкости и стекла.

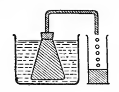


Рис. 163. Определение коэффициента расширения.

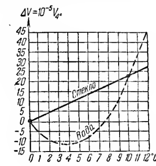


Рис. 164. Аномалия воды.

Жидкости при нагревании расширяются; исключением является вода. Вода сжимается при нагревании от 0° до 4° С и при дальнейшем нагревании расширяется. При 7,5° она имеет тот же объем, что и при 0°.

Аномалия воды (рис. 164). Вода при 4° С достигает наибольшей плотности. Она обладает ненормальными свойствами и в твердом состоянии (при температуре ниже нуля).

Роль аномалии воды в природе: замерзание озер с поверхности вглубь, расширение воды при замерзании, взрывное действие замерзающей воды (разрыв камней).

г) Расширение газообразных тел

Основной опыт (рис. 165). Колба с отводной трубочкой заполнена воздухом, трубочка погружена в воду. При нагревании колбы рукой вследствие расширения воздуха образуются выходящие из воды пузырьки. При охлаждении колбы вода входит в трубочку.

Измерения (рис. 166). Отводная трубка делается длинной и изгибается под прямым углом. Капля ртути запирает определенную массу воздуха. При погружении колбы в теп-

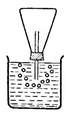


Рис. 165. Тепловое расширение газа.

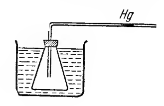


Рис. 166. Определение коэффициента расширения газа.

лую воду ртутный столбик перемещается на несколько сантиметров вправо вследствие расширения запертого в колбе воздуха. Объем колбы и отводной трубки измеряются перед опытом.

Коэффициент расширения β для всех идеальных газов одинаков и равен $\beta = \frac{1}{273}$ объема при 0° С и при условии, что нагревание происходит при постоянном давлении.

$$V_t = V_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right).$$

Коэффициенты теплового расширения

Коэффициенты линейного расширения

Бетон	0,000012
Железо	0,000012
Стекло	0,000009
Инвар	0,000001
Кварцевое стекло	0,000005
Латунь	0,000018
Медь	0,000016
Цинк	0,000026
Алюминий	0,000024

Коэффициенты объемного расширения

Эфир	0,00163
Спирт	0,0011
Керосин	0,00096
Ртуть	0,000181
Газ $\frac{1}{273}$ объема при 0°С	0,00367

2. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

а) Абсолютная температура

Если предположить, что закон теплового расширения

$$V_t = V_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right)$$

справедлив и для низких температур (чего нельзя принять без ограничений), можно получить чисто вычислительным путем: при $t = -273°$ C объем газа обратится в нуль.

Абсолютный нуль лежит при —273,16° С.

Абсолютная температура (шкала Кельвина [1])):

$$T° = 273 + t°\ \text{C}.$$

б) Закон Гей-Люссака

Из закона расширения следует: при постоянном давлении объемы газов относятся, как абсолютные температуры:

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2. \qquad \textit{Закон Гей-Люссака}\ ^{2)}.$$

Пояснение.

$$V_1 = V_0\left(1 + \frac{t_1}{273}\right); \qquad V_2 = V_0\left(1 + \frac{t_2}{273}\right);$$

$$V_1 : V_2 = \frac{273 + t_1}{273 + t_2} = T_1 : T_2.$$

в) Закон Бойля—Мариотта

Закон устанавливает зависимость объема газа от давления при неизменной температуре. Давление замкнутой массы газа определяется высотой ртутного столба, уравновешиваемого данной массой газа, плюс атмосферное давление

$$76\ \textit{см}\ \text{рт. ст. весят}\ 76 \cdot 13{,}6\ n = 1033\ n.$$

---

[1]) Названа в честь английского физика лорда Кельвина (1824—1907).

[2]) Французский физик и химик (1778—1850).

При постоянной температуре объем данной массы газа обратно пропорционален его давлению.

$V_1 : V_2 = p_2 : p_1$, или $pV = \text{const}$, при постоянной $t°$. *Закон Бойля—Мариотта*[1]).

Для экспериментальной проверки закона служит манометр (рис. 167). К шкале длиной свыше 2 *м* прикрепляются две подвижные стеклянные трубки, связанные толстостенным резиновым шлангом. Левая трубка закрывается стеклянным краном, правая — открыта. При открытом кране ртуть в обеих трубках стоит на одинаковых уровнях. При закрытии крана в левой трубке остается некоторое количество воздуха; при подъеме правого колена манометра воздух в левом колене сжимается. Разность высот уровней ртутных столбиков, сложенная с атмосферным давлением, дает давление замкнутого воздушного столбика.

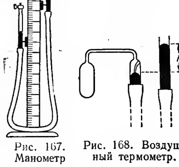


Рис. 167. Манометр со шлангом.

Рис. 168. Воздушный термометр.

Из законов Бойля—Мариотта и Гей-Люссака получается:

$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ — уравнение состояния идеального[2]) газа.

Если в уравнении состояния газа принять $V_1 = V_2$, то

$$p_1 : p_2 = T_1 : T_2.$$

Применение. Воздушный термометр Жолли (рис. 168). Отсчет производится, как по манометру. Постоянный объем воздуха очень легко установить посредством впаянного в трубку стеклянного указателя. Нулевой отсчет произ-

[1]) В 1662 г. открыт английским физиком Бойлем; в 1676 г. уточнен французским физиком Мариоттом.

[2]) «Идеальным» называют газ, состояние которого так далеко от насыщения, что выполняются газовые законы. О насыщении см. 4-д.

водится при погружении колбы в тающий лед; при этом правое колено поднимается или опускается до тех пор, пока стеклянное острие не коснется мениска ртути. При погружении термометра в жидкость неизвестной температуры снова нужно установить тот же объем; при этом получают измеримое избыточное давление, которое дает возможность вычислить T_2.

Во всех этих измерениях необходимо к разности высот уровней ртутных столбиков прибавлять атмосферное давление.

г) Изменение удельного веса и плотности с температурой

Из того, что объем изменяется при нагревании, следует, что удельный вес и плотность также зависят от температуры. В таблицах обе величины обычно приводятся к 0° C и давлению 760 *мм* рт. ст.

$$G = V_0\gamma_0 = V_t\gamma_t = V_0(1+\beta t)\gamma_t; \quad \gamma_t = \frac{\gamma_0}{1+\beta t} \approx \gamma_0(1-\beta t),$$

$$M = V_0\rho_0 = V_t\rho_t = V_0(1+\beta t)\rho_t; \quad \rho_t = \frac{\rho_0}{1+\beta t} \approx \rho_0(1-\beta t).$$

Приведение массы газа к нормальным условиям

$$V_0 = \frac{Vp}{760}\cdot\frac{273}{T}.$$

Вес газа $G = V_0\gamma_0 = \frac{Vp}{760}\cdot\frac{273}{T}\gamma_0$.

3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛА (КАЛОРИМЕТРИЯ)

Термометр измеряет тепловое состояние тела. Различные тела могут быть приведены в одинаковые тепловые состояния путем сообщения им весьма различных количеств тепла. За единицу количества тепла принимается калория.

1 *килограмм-калория (ккал)* есть такое количество тепла, которое необходимо сообщить 1 *кг* воды, чтобы нагреть его на 1° C, от 14,5° до 15,5° C. 1 *грамм-калория (кал)* есть такое количество тепла, которое необходимо сообщить 1 *г* воды, чтобы его нагреть на 1° C, от 14,5° до 15,5° C.

В практической калориметрии вместо массы пользуются весом. При этом различия не получается, так как в большинстве случаев при взвешивании сравниваются массы. Количество тепла представляет некоторое количество энергии (ср. III. 6).

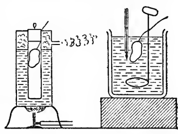


Рис. 169. Определение удельиой теплоемкости.

Для нагревания 1 *г* воды на 1° С требуется 1 *кал*; для нагревания 1 *г* какого-либо другого вещества на 1° С требуется другое количество тепла, обычно меньшее.

Удельная теплоемкость вещества есть такое количество тепла, которое нужно, чтобы нагреть 1 *г* вещества на 1° С.

Количество тепла = массе × уд. теплоемкость × × разность температур

$$Q = mc\,(t_2 - t_1)\ \textit{кал}\ \text{или}\ \textit{ккал}.$$

Удельные теплоемкости в кал/г град или в ккал/кг град

Платина, золото, свинец	0,03	Ртуть	0,03
Медь, цинк, латунь	0,09	Керосин	0,50
Железо, никель	0,11	Спирт	0,57
Стекло	0,20	Вода	1
Лед	0,50		

Для измерения количества тепла служат калориметры (рис. 169). При подсчетах применяется *правило Рихмана:*

Потеря тепла нагретым телом = получению тепла холодным телом.

При этом следует учесть поглощение тепла калориметром (водяной эквивалент калориметра). Калориметр имеет массу m_k, вещество калориметра обладает удельной теплоемкостью c_k, тогда водяной эквивалент $W = m_k c_k$. Определение удельной теплоемкости вещества в водяном калориметре ($c = 1$), температура смеси t_m:

$$m_1 x\,(t_1 - t_m) = m_2 \cdot 1\,(t_m - t_2).$$

m_2 представляет собой сумму масс воды и водяного эквивалента калориметра $m_2 = m + m_k c_k$. Калориметр может также применяться для определения высоких температур у малых тел, например температуры красного каления железного шарика. Относительно удельных теплоемкостей газов см. стр. 135.

4. ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ

а) Движение молекул

Состояния тел могут быть полностью объяснены характером движения их молекул. В твердых телах молекулы связаны между собой силами сцепления крепче, чем в жидкостях (ср. стр. 37 и стр. 77). С увеличением температуры молекулы совершают все ускоряющиеся колебания вокруг некоторых положений равновесия. Обратное явление происходит при понижении температуры, и при достижении абсолютного нуля молекулярное движение полностью бы прекратилось. Переход от твердого состояния к жидкому (плавление) происходит благодаря ослаблению взаимных связей между молекулами. При переходе от жидкого состояния к газообразному (испарение) взаимные связи до такой степени ослабевают, что силы сцепления полностью исчезают. Газ заполняет весь предоставленный ему объем.

б) Плавление и отвердевание

Плавление каждого вещества начинается при некоторой определенной для него температуре. Во время плавления, несмотря на равномерный приток тепла, температура не повышается до тех пор, пока не расплавится последний кусок вещества. При отвердевании наблюдается обратный процесс.

Температура (точка) плавления = температуре (точке) отвердевания.

Точка плавления растворов и сплавов ниже, чем точка плавления составных частей. Мягкий припой плавится при температуре 180° C, а его составные части имеют более

высокие точки плавления, например, свинец плавится при 327°, а олово — при 232°. *Сплав Вуда* плавится уже при 70°. При плавлении обычно происходит увеличение объема. Вода, чугун и висмут представляют исключение. При отвердевании воды ее объем увеличивается примерно на 1/10 (взрывное действие льда).

Точка плавления зависит от внешнего давления.

У большинства тел точка плавления повышается с увеличением давления, у льда увеличение давления понижает точку плавления: сползание ледников (таяние под давлением и замерзание при ослаблении давления).

Опыт с бруском льда и нагруженной проволокой (рис. 170). Лед начинает плавиться (под проволокой). При уменьшении давления обе половинки льда моментально смерзаются.

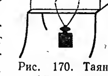


Рис. 170. Таяние льда поддавлеиием.

Теплота плавления есть количество тепла, которое необходимо для того, чтобы расплавить 1 *кг* вещества, нагретый до температуры плавления.

Теплота плавления = теплоте отвердевания.

Точки плавления и теплота плавления

Точка плавления в °C		Теплота плавления в *кал/г*	Точка плавления в °C		Теплота плавления в *кал/г*
Свинец	327	6,3	Спирт . . .	—114	25,8
Железо	1530	64	Ртуть . . .	— 38,83	2,7
Платина	1770	24,1	Вода	0	79,7
Кварцевое стекло	1700	—			

Теплота растворения. При растворении *твердого вещества* в жидкости также происходит ослабление молекулярного сцепления. Для этого требуется тепло, которое

поглощается из растворителя. Растворение вызывает понижение температуры. Примером может служить охлаждающая смесь: 4 части льда, 1 часть соли, температура смеси равна примерно —20° С.

в) Испарение и конденсация

Испарением называется переход из жидкого в газообразное состояние, происходящий ниже точки кипения. Тепло, необходимое для разрыва молекулярных связей, поглощается из жидкости; последняя остывает. Охлаждение жидкости в пористом глиняном сосуде.

Парообразованием называется переход из жидкого в газообразное состояние, за счет подведенной извне теплоты, при кипении. Температура кипения повышается с увеличением давления, так как молекулы должны преодолеть последнее для того, чтобы вылететь из жидкости.

В справочных таблицах даются точки кипения при нормальном давлении 760 *мм* рт. ст.

Точки кипения, °C

Спирт	78,4	Глицерин	290
Эфир	34,7	Ртуть	357
Бензол	80,1	Двуокись углерода	—78,5
Вода	100	Аммиак	—33,4

Повышение точки кипения с увеличением внешнего давления можно продемонстрировать в *папиновом котле*

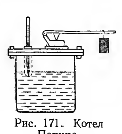


Рис. 171. Котел Папина.



Рис. 172. Кипение при пониженном давлении.

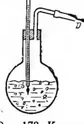


Рис. 173. Кипение при пониженном давлении.

(рис. 171) — котле с навинчивающейся крышкой и предохранительным клапаном, с регулируемым давлением. Уменьшение давления понижает точку кипения.

Кипение при пониженном давлении.

Опыт: горячая вода в закрытой колбе снова закипает, если охлаждать ту часть колбы, где находится пар (рис. 172. Осторожно!).

Кипение без подвода внешнего тепла путем отсоса находящегося над жидкостью пара (рис. 173). В начале опыта колба заполняется кипящей водой. Пароотводная трубка присоединяется к водоструйному насосу.

Зависимость точки кипения воды от внешнего давления (*p*)

p в *мм* рт. ст.	*t* в °С	*p* в *мм* рт. ст.	*t* в °С	*p* в *мм* рт. ст.	*t* в °С
690	97,31	730	98,87	770	100,37
700	97,71	740	99,25	780	100,73
710	98,10	750	99,63	790	101,10
720	98,49	760	100,00	800	101,44

Эти данные могут также применяться при определении давления воздуха по температуре кипения воды.

Давление p в ат (*кп*/*см*²) *и точка кипения в* °С

p	*t*	*p*	*t*	*p*	*t*
1	99,09	4	142,92	7	164,17
2	119,62	5	151,11	8	169,61
3	132,88	6	158,08	9	174,53
				10	179,04

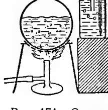


Рис. 174. Определение теплоты конденсации.

Испарение у некоторых твердых тел наступает без предварительного плавления: сублимация (сухой лед, твердая двуокись углерода).

Явление, обратное испарению, есть *конденсация*.

Теплота парообразования есть то количество тепла, которое необходимо, чтобы превратить 1 *кг* жидкости в пар. В течение процесса парообразования температура сохраняется неизменной (постоянная точка кипения).

Теплота парообразования = теплоте испарения.

Практически проще определять теплоту конденсации (рис. 174). Пар из колбы отводится через стеклянную трубку в стаканчик с холодной водой, где он конденсируется.

Определяются начальная масса охлаждающей воды и ее начальная температура. Зная конечную температуру и разность начальной и конечной масс воды, можно определить количество сконденсировавшегося пара и теплоотдачу.

Теплота парообразования при нормальной температуре кипения (кал)

Вода	539
Спирт	207
Эфир	88,4

г) Теплота сгорания (теплотворная способность)

Теплотворной способностью топлива называется теплота, выделяемая при сгорании 1 *кг* твердого топлива или 1 $м^3$ газа. Сжигание осуществляется на дне стеклянной колбы (рис. 175), куда подводится кислород. Газы, образовавшиеся при сгорании, отводятся змеевиком через калориметр и отдают ему свое тепло.

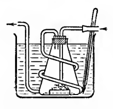


Рис. 175. Определение теплоты сгорания.

Теплотворные способности некоторых топлив в кал/г

Каменный уголь	7100—7800
Коксовый газ	7800
Брикет бурого угля	6500
Бурый уголь (неочищенный)	4500
Дерево	3600—4000
Спирт	7000
Бензин	10 400
Светильный газ	4400—5500

д) Насыщающие и ненасыщающие пары

Парообразование в вакууме. Если внести каплю воды в торичеллиеву пустоту ртутного барометра, то она частично испарится: ртутный столбик опустится (рис. 176). При наклоне трубки, т. е. уменьшении объема пара, происходит конденсация. Давление пара и ртутного столбика уравновешены атмосферным давлением. Спирт и эфир обладают бо́льшим давлением паров, чем вода. Дальнейшее испарение возможно при нагревании, а конденсация — при охлаждении барометрической трубки.

Пространство насыщено парами, если, кроме пара, имеется еще и жидкость. Жидкость и пар находятся в динамическом равновесии. Давление насыщающих паров — наибольшее, какое может иметь пар при данной температуре. Давление насыщающих паров возрастает с температурой; ему соответствует определенная *масса насыщающих паров*. Если продолжать подогревать насыщающий пар в верхней части барометрической трубки, то столбик ртути понизится и жидкость полностью испарится. Увеличенное таким образом пространство уже не насыщено паром; если этот ненасыщающий пар подогреть достаточно сильно, то он подчиняется газовым законам.

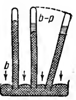


Рис. 176. Давление паров.

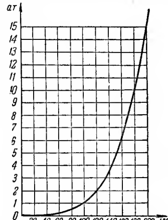


Рис. 177. Зависимость давления насыщающих паров от температуры.

Ненасыщающие пары ведут себя, как газы, однако вблизи точки конденсации газовые законы не выполняются.

Парообразование в пространстве, заполненном воздухом. Давление насыщающих паров, а также и насыщающая масса пара не зависят от того, находятся ли в этом пространстве другие пары (например, воздух).

Закон Дальтона: общее давление смеси газов равно сумме давлений отдельных ее частей.

Упругость (насыщающих) водяных паров при температурах от 0° до 200° C представлена диаграммой (рис. 177).

Давление насыщающих водяных паров p в мм рт. ст. и насыщающая масса m в г/м³

$t°$	p	m	$t°$	p	m	$t°$	p	m
−10	2	2,1	9	8,6	8,8	20	17,5	17,3
−5	3	3,2	10	9,2	9,4	21	18,6	18,3
0	4,6	4,8	11	9,8	10,0	22	19,8	19,4
1	4,9	5,2	12	10,5	10,7	23	21,1	20,6
2	5,3	5,6	13	11,2	11,4	24	22,4	21,8
3	5,7	6,0	14	12,0	12,1	25	23,8	23,0
4	6,1	6,4	15	12,8	12,8	26	25,2	24,4
5	6,5	6,8	16	13,6	13,6	27	26,7	25,8
6	7,0	7,3	17	14,5	14,5	28	28,3	27,2
7	7,5	7,8	18	15,5	15,4	29	30,0	28,7
8	8,0	8,3	19	16,5	16,3	30	31,8	30,3

Давление насыщающих паров p некоторых жидкостей (в *мм* рт. ст.)

Температура	Вода	Спирт	Эфир
−10	2,0	6,5	113
0	4,6	12,5	185
10	9,2	24,1	286
20	17,5	44,1	440
30	31,8	78,4	636
40	55,3	133,5	924
50	92,5	215,0	1270
60	149,4	351,0	1740
70	233,7	541,2	2302
80	355,1	812,0	3000
90	525,8	1188,4	3898
100	760,0	1692,0	4952

В метеорологии играют роль следующие понятия:

Абсолютная влажность = фактическое содержание водяных паров в воздухе.

Относительная влажность =

$$= \frac{\text{фактическое количество паров при данной температуре}}{\text{возможное количество паров}}.$$

Фактическое количество водяных паров определяется *по точке росы* (рис. 178). Посредством испарения можно понизить температуру металлического зеркала, находящегося на передней части сосуда, заполненного эфиром, до такой величины, что наступит конденсация влаги из окружающего воздуха (выпадение росы). Соответствующая температура отсчитывается по термометру, который погружен в эфир. По таблице можно найти соответствующую этой температуре массу насыщающих водяных паров. Относительная влажность выражается в процентах.

Рис. 178. Определение точки росы.

е) Сжижение газов

Так как ненасыщающие пары ведут себя, как газы, то и газы должны при повышении давления или понижении температуры превращаться в пар или жидкость. Для каждого газа существует определенная температура, выше которой, несмотря на применение любого высокого давления, он не может быть переведен в жидкое состояние. Эта температура называется *критической*, а давление, необходимое для сжижения при этой температуре, *критическим*.

Критическая температура, критическое давление и нормальные точки кипения (т. к.)

	$t_к$ °C	$p_к$ (*ат*)	т. к. °C
Водяной пар	374	217	100
Аммиак	132	112	— 33
Двуокись углерода	31	73	— 78,5
Кислород	—119	50	—183
Водород	—240	12,8	—253

Испарение сжиженных газов при уменьшении давления происходит очень быстро; необходимое для этого тепло поглощается из жидкости и окружающего пространства. Жидкая двуокись углерода, вытекая из сосуда, замерзает вследствие охлаждения. На явлении поглощения тепла при быстром испарении (расширении) основано действие

холодильников (рис. 179). Они работают на жидком сернистом ангидриде (SO_2), сжиженном аммиаке и углекис-

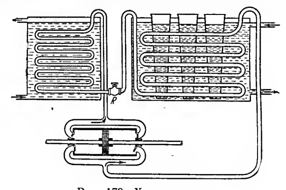


Рис. 179. Холодильник.

лоте. Вытекающая из редукционного крана R жидкость испаряется в системе трубок, проходящих через охлаждающую жидкость (раствор соли). После расширения газ повторно сжимается и охлаждается.

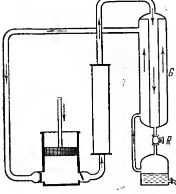


Рис. 180. Сжижение воздуха по методу Линде.

Метод сжижения воздуха Линде (1895)

Компрессор (рис. 180) прогоняет сжатый воздух через холодильник. Охлажденный воздух проходит через редукционный кран R и расширяется. При этом происходит дальнейшее охлаждение. Охлажденный воздух возвращается через прибор обратного тока G к компрессору. В приборе обратного тока воздух, снова идущий к крану R, дополнительно охлаждается обратным током воздуха. Постепенное охлаждение позволяет получить температуру ниже критической и, следовательно, добиться сжижения воздуха.

5. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА

Тепло передается посредством теплопроводности, конвекции и лучеиспускания.

а) Теплопроводность

Лучшими проводниками тепла служат металлы. Между теплопроводностью и электропроводностью существует определенная связь. Теплопроводность определяется числом перенесенных калорий. Лучшей теплопроводностью обладает серебро. Если принять *теплопроводность* серебра за 100, то для других металлов получаются такие относительные теплопроводности:

Медь	90	Цинк	27
Железо	14 ÷ 17	Олово	15
Свинец	8	Нейзильбер	6

Плохими проводниками тепла являются стекло (0,2) и дерево; самыми плохими — покоящиеся газы. Тепловыми изоляторами являются пористые вещества; содержащийся в порах воздух служит изолятором. Плохими проводниками являются также покоящиеся жидкости.

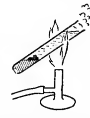


Рис. 181. Жидкость — плохой проводник тепла.

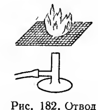


Рис. 182. Отвод тепла проволочной сеткой.

Опыты: Кусок льда, удерживаемый грузом на дне пробирки, не плавится, даже если находящаяся над ним вода нагрета до кипения (рис. 181).

Газовое пламя горит только над проволочной сеткой до тех пор, пока последняя отводит тепло. Газ под сеткой не достигает температуры воспламенения (рис. 182).

б) Конвекция

Выравнивание температур в жидкостях и газах происходит главным образом благодаря токам (конвекция). Конвекция может наступить только в том случае, если жидкость подогревается снизу или охлаждается сверху.



Рис. 183. Тепловые потоки в жидкости.

Основной опыт. Подогревание прямоугольной стеклянной трубки (рис. 183) с одного из нижних углов. Добавлением красящего вещества можно сделать конвекцию видимой.

в) Тепловое излучение

Горячие тела излучают тепло, которое передается через воздух или пустоту без их заметного нагревания. Солнечные лучи, проходя холодное мировое пространство, сообщают каждому перпендикулярно-облученному *см*² поверхности до 2 *кал/мин* (*постоянная солнечной радиации*). В зависимости от характера поверхности облученное тело поглощает больше или меньше тепла. Тела, которые сильно поглощают тепловые лучи, сами также излучают большие количества тепла (шероховатые черные поверхности). К тепловым лучам применимы те же законы отражения и преломления, что и к световым лучам (ср. IV. 3 и 4).

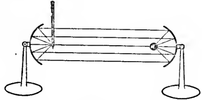


Рис. 184. Тепловые лучи.

Опыт. Горячий металлический шарик находится в фокусе вогнутого зеркала. Тепловые лучи концентрируются в фокусе второго зеркала (рис. 184), промежуточное пространство не нагревается. Более подробно о тепловом излучении смотри в разделе «Излучение».

6. РАБОТА И ТЕПЛОТА

Теплота измеряет внутреннюю энергию, переданную одним телом другому без совершения механической работы. При изменении внутренней энергии тела меняется его температура.

Так, при пилке, точке, сверлении за счет совершения механической работы увеличивается внутренняя энергия обрабатываемой детали и инструмента, и они нагреваются. *Роберт Майер*[1]) первым установил соотношение между единицами работы, теплоты и внутренней энергии: первый основной тепловой закон

427 *кпм* = 1 *ккал*; механический эквивалент тепла.

При определении механического эквивалента тепла (рис. 185) работа против сил трения ленточного тормоза

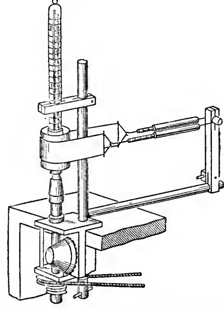


Рис. 185. Определение механического эквивалента тепла.

увеличивает внутреннюю энергию медного цилиндра, который при этом нагревается.

Газы имеют два различных значения удельных теплоемкостей в зависимости от того, происходит ли нагревание при

[1]) 1814—1878, врач и естествоиспытатель в Гейльбронне.

постоянном давлении (c_p) или при постоянном объеме (c_v). Если нагревать газ при постоянном давлении (подвижный поршень), то часть подведенного тепла пойдет на работу расширения газа, т. е. на подъем поршня и преодоление внешнего давления, а часть — на увеличение скорости молекул, т. е. увеличение внутренней энергии и связанное с нею повышение температуры. В случае нагревания массы газа в замкнутом объеме (постоянном) все подведенное тепло идет на увеличение энергии движения молекул, газ нагревается сильнее (температура повышается больше).

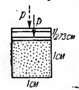


Рис. 186. К вычислению механического эквивалента тепла по Майеру.

$c_p > c_v$; $\frac{c_p}{c_v} = \varkappa$ имеет для двуатомных газов значение 1,41. Из значений для c_p и c_v Роберт Майер вычислил механический эквивалент тепла (рис. 186).

Превращение тепла в работу никогда не происходит полностью; часть тепла всегда переходит от тела с более высокой температурой (нагреватель) к телу с более низкой температурой (холодильник).

В мысленном эксперименте Карно проводится круговой процесс, в котором газ или жидкость, совершая работу, претерпевает изменения температуры и давления и в конце процесса возвращается в первоначальное состояние.

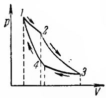


Рис. 187. Круговой процесс.

Круговой процесс Карно слагается из двух изотерм[1]) и двух адиабат[2]) (рис. 187). Если по оси ординат отложить значения p, а значения v — по оси абсцисс, то закон Бойля — Мариотта будет изображен ветвью равносторонней гиперболы. Эта кривая называется изотермой. При изотермическом изменении все подведенное тепло превращается в работу (увеличение объема), или наоборот, при уменьшении объема выделяется тепло. Получается $p_1 : p_2 = v_2 : v_1$ (Бойль — Мариотт).

---

[1]) Изос (греческ.) — равный, термос (греческ.) — тепло.

[2]) А (греческ.) — приставка отрицания, диабейнейи — проходить насквозь. Процесс, который представляется адиабатой, протекает так быстро, что не может происходить выравнивания температур; адиабатный — непроницаемый.

Для адиабатных изменений (быстрые сжатие или расширение) справедлив *закон Пуассона:*

$$p_1 : p_2 = v_2^{\varkappa} : v_1^{\varkappa}; \quad \varkappa = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{или}$$

$$T_1 : T_2 = p_1 v_1 : p_2 v_2 = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\varkappa - 1}.$$

При этом в работу превращается внутренняя энергия; при расширении газ охлаждается, а при сжатии соответственно нагревается.

На полную внешнюю работу кругового процесса адиабаты не оказывают влияния. Вследствие того, что показатель степени $\varkappa > 1$, они круче изотерм. Произведенная в круговом процессе работа равна $Q_1 - Q_2$, если Q_1 — количество тепла, полученное на изотерме *1*, *2*, Q_2 — количество тепла, отданное на изотерме *3*, *4*. Отсюда получаем:

Термический коэффициент полезного действия $=$

$$= \frac{\text{совершенная работа}}{\text{подведенное тепло}}$$

$$\boxed{\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}}\ .$$

Коэффициент полезного действия может достичь своего максимального значения — единицы лишь в том случае, когда T_2 понизится до абсолютного нуля.

В паровой машине с температурой котла 180° C и с охлаждающей водой при температуре 50° C к. п. д. $\eta = \frac{130}{453} = 29\%$. Вследствие же потерь на трение и потери тепла на излучение к. п. д. тепловой машины едва достигает 25%.

Второй основной тепловой закон. Превращение тепла в работу возможно только частично, так как некоторое количество тепла обязательно передается окружающим телам с более низкой температурой.

Формулировка Планка. Невозможна такая машина, которая поглощала бы тепло у какого-нибудь тела (резервуара тепла) и превращала в работу без того, чтобы не происходили никакие иные изменения.

Увеличение внутренней энергии при трении, а также теплота, сообщаемая холодной воде (холодильника),

являются формами энергии, которые не могут быть использованы в дальнейшем. В качестве меры этого обесценивания энергии *Клаузиус* ввел понятие *энтропии*:

> Энтропия не меняется в идеализированных обратимых процессах (круговых процессах). Каждый естественный процесс протекает таким образом, что энтропия растет.

7. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

а) Паровые машины

Давление паров, находящихся над жидкостью, увеличивается с возрастанием температуры очень быстро (ср. стр. 128). В 1705 г. *Ньюкомен* использовал в своей паровой машине однократного действия давление пара для совершения работы. Давлением пара в цилиндре поднимался поршень. Опускание поршня осуществлялось путем конденсации пара в цилиндре; для этого в цилиндр впрыскивалась холодная вода. *Джемсу Уатту* удалось в 1782 г. сконструировать паровую машину двойного действия [1].

Посредством распределительного золотника поступающий в цилиндр пар направляется попеременно то по одну, то по другую сторону поршня. Поступательное движение поршня превращается во вращательное движение посредством поршневого пальца, шатуна и кривошипа (рис. 188). Маховик служит для вывода поршня из мертвых положений, наступающих, когда шатун и кривошип лежат на одной прямой.

Типы паровых котлов. В жаротрубных котлах горячие газы пропускаются по широким трубам через котел. В водотрубном котле имеется большее количество наклонно поставленных труб, которые обогреваются продуктами сгорания. Горячая вода собирается в котле, охлажденная — спускается в систему труб и там нагревается.

В машинах *полного давления* упругость пара постоянна в течение хода поршня. Работа одного хода поршня определяется произведением поперечного сечения поршня на

[1] Ползунов построил непрерывно работавшую паровую машину в 1765 г. По-видимому, Уатт о ней не знал. (*Прим. ред.*)

давление пара и длину хода поршня. Отработанный пар, при обратном ходе поршня, выбрасывается или наружу (паровоз), или в холодильник. В первом случае пар должен преодолеть внешнее атмосферное давление. При подсчете работы нужно брать значение давления пара в цилиндре, уменьшенное на одну атмосферу. Во втором случае пар конденсируется в воду и охлаждается, давление падает

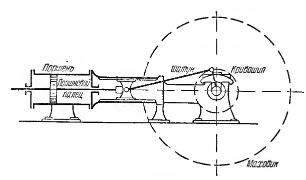


Рис. 188. Схема поршневой паровой машины.

почти до нуля; в этом случае нужно при подсчете работы брать полное давление пара.

Расширительные — экономические машины; пар запирается между $^1/_4$ и $^1/_3$ хода поршня.

Вследствие расширения заключенного в цилиндре пара поршень продвигается дальше, до конца цилиндра. При этом согласно газовым законам давление пара падает сильнее (адиабатически). Работа подсчитывается по полному давлению пара, как в машинах полного давления, только путь составит от $^1/_4$ до $^1/_3$ высоты подъема поршня. После прекращения подачи пара замкнутый в цилиндре пар производит дополнительную работу вследствие расширения. Общая мощность экономической машины меньше мощности машины полного давления таких же размеров, но в эксплуатации она экономичнее, так как при данной мощности требуется только от $^1/_4$ до $^1/_3$ количества пара. Коэффициент полезного действия паровой машины не более 25%. Путем приблизительного расчета можно убедиться в малости коэффициента полезного действия. При расходе

1,1 *кп* угля с теплотворной способностью 5500 *ккал* в час паровая машина дает, как показывает опыт, 1 *лс*. Это соответствует работе в 75 · 3600 *кпм* = 270 000 *кпм*. Израсходованный уголь может дать энергию, равную 1,1 · 5500 × × 427 *кпм* = 2 583 350 *кпм*. Совершенная же работа соответствует только 10,4% затраченной энергии. Путем технических усовершенствований удается лишь незначительно увеличить коэффициент полезного действия. Большая часть тепла уходит через трубу в воздух вместе с газами, часть тепла теряется на излучение, еще часть теряется при конденсации отработанного пара, небольшая часть расходуется на преодоление сил трения.

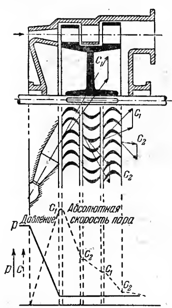


Рис. 189. Турбина Куртиса.

б) Паровые турбины

В паровой турбине давление пара создает непосредственно вращательное движение. Подобно воде в *водяной турбине Пельтона* пар течет из сопла на лопасти колеса и приводит его во вращение. Одновременно с кинетической энергией вытекающего пара используется энергия расширения. Текущий далее пар направляется неподвижными направляющими лопатками на лопатки следующего рабочего колеса (рис. 189). При уменьшении давления объем пара возрастает. Поэтому размеры вращающихся колес, сидящих на общей оси, делают постепенно возрастающими. Турбины, в противоположность поршневым машинам, дают более плавный ход и более высокий коэффициент полезного действия (до 30%). Преимущество заключается также в достижении большего числа оборотов, которое может быть уменьшено посредством зубчатой передачи. Турбины при-

меняются, прежде всего, на электростанциях для вращения генераторов, а также на пароходах. В 1924 г. Целли сконструировал турбинный локомотив.

в) Двигатели внутреннего сгорания

В *двигателе с зажиганием* (*Отто* и *Ланген*, 1865 г.) сгорание топлива происходит в цилиндре. Вследствие этого удается избежать потерь тепла, которые так велики в паровых машинах; но вместе с тем повышаются требования, предъявляемые к материалу цилиндра и поршня. Горючим служит газ или смесь из воздуха и бензина, который

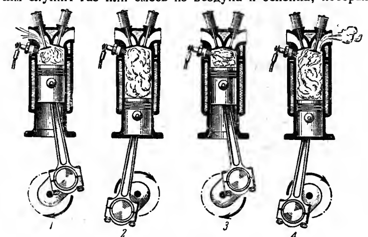


Рис. 190. Работа четырехтактного двигателя.

всасывается из карбюратора или (в двигателях большой мощности) накачивается насосом. Газ или горючая смесь поджигается в момент наибольшего сжатия посредством электрической искры, воспламеняется и оказывает сильное давление на поршень. Различают два вида двигателей.

1. *Четырехтактный двигатель* (рис. 190):

Первый такт, *всасывание*. При помощи маховика и кривошипно-шатунного механизма поршень оттягивается вниз. Пространство над поршнем увеличивается; благодаря создавшемуся разрежению рабочая смесь всасывается через впускной клапан в цилиндр.

Второй такт, *сжатие*. Впускной и выхлопной клапаны закрыты. Смесь сжимается поднимающимся поршнем.

Третий такт, *рабочий ход*. В момент наибольшего сжатия смесь воспламеняется электрической искрой, при этом смесь взрывается и толкает поршень вниз. Маховик получает новый импульс.

Четвертый такт, *выхлоп*. Снова поднимающийся поршень выталкивает отработанные газы через открывшийся выхлопной клапан наружу.

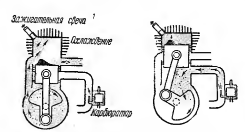


Рис. 191. Работа двухтактного двигателя.

Движение клапанов регулируется двумя коническими шестернями и кулачковым валом. Кулачки открывают клапаны в соответствующий такт, после чего клапан закрывается посредством пружины.

2. *Двухтактный двигатель* (рис. 191):

Такты 1, 3 и 4 объединяются в один такт; второй такт этого двигателя обеспечивает предварительное сжатие рабочей смеси.

Двигатель с *самовоспламенением* (*Дизель*, 1897 г.) работает при сжатии от 30 до 35 *ат*. Всасываемый в цилиндр воздух нагревается при этом до такой температуры, что жидкое тяжелое топливо, вспрыскиваемое в цилиндр, в момент наивысшего сжатия сразу воспламеняется. Давление горячих газов толкает поршень в обратном направлении.

Дизельные моторы (или дизели) конструируются в большинстве случаев четырехтактными. Преимущество дизельных моторов заключается в возможности применения более дешевого «тяжелого» топлива, а также в отсутствии сложного устройства для зажигания.

Дизели зарекомендовали себя главным образом как двигатели для грузовых машин и для судов. Они значительно тяжелее обычных двигателей внутреннего сгорания той же мощности. Коэффициент полезного действия двигателей достигает 35—38%. Все двигатели приводятся в действие посредством внешнего привода, действующего на маховик (стартер). В дизелях запуск значительно труднее, так как сжимаемый воздух приобретает необходимую для воспламенения температуру только тогда, когда цилиндр прогрет.

IV. ОПТИКА

А. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

а) Источники света

Свет обладает энергией. В противоположность звуку свет распространяется и в пустоте. Источниками света в большинстве случаев являются сильно нагретые тела (угли дуговой лампы, накаленная проволока в лампе накаливания, Солнце, звезды); световые явления могут возникать и при низких температурах (разряд в газополных трубках, свечение фосфорных и урановых препаратов).

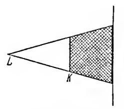


Рис. 192. Образование тени.

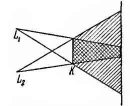


Рис. 193. Образование тени и полутени.

Геометрическая оптика охватывает явления, в которых распространение света может считаться прямолинейным. Прямолинейное распространение света подтверждается образованием тени и полутени. От точечного источника возникает за непрозрачным телом область тени (рис. 192); от двух или нескольких источников — тени и полутени (рис. 193).

б) Скорость света

Свету требуется для распространения некоторое время. Это было впервые установлено в XVII столетии; до тех пор считали скорость распространения неизмеримо большой.

Скорость света $c = 300\,000$ *км/сек.*

Более точные значения (Майкельсон, 1927): 299 796 *км/сек* ± 5 *км/сек* (Пиз и Пирсон): 299 774 *км/сек* ± ± 4 *км/сек.*

Астрономические определения скорости света

1. Датский астроном *Олаф Ремер* заметил (1676 г.), что время оборота первого спутника Юпитера кажется

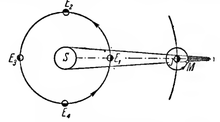


Рис. 194. Определение скорости света по Ремеру.

непостоянным. Вычисленное время обращения равно 42,5 часа. Если Земля находится в точках E_1 или E_3 (рис. 194), то вычисленные и наблюденные времена совпадают. По пути от E_1 через E_2 к E_3 Земля удаляется от Юпитера, наблюденное время обращения увеличивается, так как путь света между двумя затмениями спутника Юпитера вследствие удаления Земли возрастает. На пути от E_3 через E_4 к E_1 Земля приближается к Юпитеру, наблюденное время обращения меньше вычисленного, так как в этом случае Земля двигается навстречу свету. Из этих наблюдений Олаф Ремер вычислил время, которое затрачивает свет на прохождение диаметра земной орбиты.

2. *Брадлэй* определил скорость света в 1728 г. из аберрации света от звезды. Вследствие вращения Земли вокруг Солнца звезда, расположенная на перпендикуляре к земной

орбите, в течение года описывает круг; звезда, расположенная под небольшим углом к земной орбите, описывает эллипс. Радиус круга и большая полуось эллипса видны под одним и тем же углом в 20,4″. Этот угол определяет отношение скорости движения Земли к скорости света.

Наземные определения скорости света

3. В *опыте Физо* используется перпендикулярное отражение светового луча, который может кратковременно гаситься вращающимся зубчатым колесом Z. С увеличением скорости вращения колеса поле зрения затемняется, так

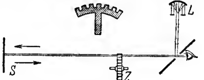


Рис. 195. Определение скорости света по Физо.

как отраженный луч, который в прямом направлении прошел в отверстие (просвет), на обратном пути попадает на зубец колеса. Зная скорость вращения колеса и расстояние до отражающего зеркала, можно вычислить промежуток времени, затраченный светом на прохождение пути в обоих направлениях, и, следовательно, скорость света (рис. 195).

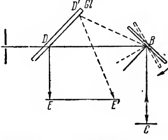


Рис. 196. Определение скорости света по Фуко.

4. *Опыт Фуко* (1862). Согласно закону отражения при повороте отражающего зеркала на угол α отраженный луч повертывается на угол 2α. Пусть Gl — наклонно поставленная стеклянная пластинка, через которую свет частично проникает, частично от нее отражается. По смещению EE' отраженного луча, при известной скорости вращения зеркала, можно вычислить время, которое затрачивает луч света, чтобы пройти путь от B до C и обратно, а следовательно, и скорость света (рис. 196).

Метод Фуко был усовершенствован *Майкельсоном*. Вместо плоского зеркала он применил восьмигранное зеркало, которое вращалось при помощи сжатого воздуха. Путь света составлял 70 *км*.

2. ФОТОМЕТРИЯ

а) Основные законы и единицы измерения

Количество света, излученное точечным источником в одну секунду, называется полным световым потоком Φ_0. Единицей светового потока является *люмен* (1 *лм*).

Положим, что световой поток Φ_0 пронизывает внутреннюю поверхность шара радиусом 1 *м*. На этой шаровой поверхности выделим некоторый участок ω; эта поверхность ω совместно с источником света, расположенным в ее центре, ограничивает световой конус с телесным углом при вершине, равным ω.

Силой света I называется световой поток, посылаемый равномерно излучающим во все стороны источником света, в единицу телесного угла.

$$\text{Сила света} = \frac{\text{световой поток}}{\text{телесный угол}}; \quad I = \frac{\Phi}{\omega}.$$

Световым эталоном служит излучатель определенной формы, осуществленный в виде абсолютно черного тела (см. VI. 2-а) при температуре 2046,6° K.

Единицей силы света является свеча (*св*), равная $\frac{1}{60}$ силы света, излучаемой 1 *см*² поверхности эталона в направлении нормали к его поверхности.

Освещенность E выражается световым потоком, приходящимся на единицу поверхности. За единицу освещенности принимается 1 люкс (*лк*).

$$\text{Освещенность} = \frac{\text{световой поток}}{\text{освещаемая поверхность}}; \quad E = \frac{\Phi}{S},$$

$$1 \text{ люкс} = \frac{1 \text{ люмен}}{1 \text{ м}^2} = 10^{-4} \text{ фотов}.$$

Световой поток, заключенный в телесном угле ω, создает на перпендикулярно облучаемой поверхности, находящейся на расстоянии r_1, освещенность $E_1 = \frac{\Phi}{\omega r_1^2} = \frac{I}{r_1^2}$; на расстоянии r_2 — освещенность $E_2 = \frac{\Phi}{\omega r_2^2} = \frac{I}{r_2^2}$.

Поэтому $E_1 : E_2 = r_2^2 : r_1^2$ (рис. 197).

Если освещаемая поверхность наклонена под углом φ, то освещенность с возрастанием угла уменьшается (рис. 198), причем следует обратить внимание на то, что в оптике

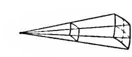


Рис. 197. Световая пирамида.
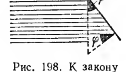


Рис. 198. К закону Ламберта.

угол падения всегда отсчитывается от перпендикуляра, восставленного из точки падения луча.

Закон Ламберта (1750 г.). Освещенность какой-либо поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности и прямо пропорциональна косинусу угла падения

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varphi.$$

Яркость B является мерой излучения самосветящейся поверхности. Единицей яркости является 1 стильб (*сб*)[1].
$1\ сб = \frac{1}{60}$ яркости черного тела при 2046,6°K, $1\ сб = \frac{1\ св}{1\ см^2}$.

$$\text{Яркость} = \frac{\text{сила света}}{\text{излучающая поверхность}}; \quad B = \frac{I}{S}.$$

б) Фотометр

Фотометрия занимается изучением силы света. При одинаковой освещенности силы света двух точечных источ-

[1]) Стильбеин (греч.) — освещать, сверкать.

ников прямо пропорциональны квадратам их расстояний от освещаемой поверхности.

$$I_1 : I_2 = r_1^2 : r_2^2.$$

Пояснение.

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}; \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}; \quad E_1 = E_2.$$

1. *Фотометр Бунзена* состоит из белого бумажного экрана, который в середине промаслен стеарином (рис. 199).

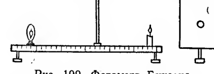


Рис. 199. Фотометр Бунзена.

Экран, расположенный на оптической скамье между двумя источниками света, передвигается до тех пор, пока масляное пятно не сделается невидимым. Тогда освещенность в проходящем и отраженном свете одинакова.

2. *Фотометр Ричи* (рис. 200). У него вместо экрана имеется белая картонная призма; наблюдение ведут сверху; призма устанавливается таким образом, чтобы обе стороны были одинаково освещены.

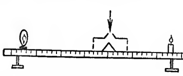


Рис. 200. Фотометр Ричи.

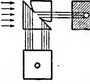


Рис. 201. Фотометрический кубик Луммера и Бродхуна.

3. *Отражающий фотометр Луммера* и *Бродхуна* состоит из двух призм; одна — полного отражения с плоскими гранями; другая имеет сферическую грань, часть которой имеет плоский срез; последний прижат к грани плоской призмы. При неодинаковой освещенности появляются или светлый круг на темном фоне, или наоборот. На рис. 201 изображено одностороннее освещение, чтобы показать проходящие и отраженные лучи. При одинаковой освещенности с обеих сторон круг исчезает (ср. полное отражение, 4-а)

4. В *теневом фотометре Румфорда* сравниваются степени густоты полутеней, которые отбрасывает стержень, освещаемый двумя источниками. Ныне он представляет только исторический интерес.

5. Современные фотометры основаны на фотоэлектрическом действии; в них применяются фотоэлементы или селеновые элементы.

3. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ

а) Плоские зеркала

Закон отражения. Падающий луч, нормаль, т. е. перпендикуляр к отражающей поверхности в точке падения, и отраженный луч лежат в одной плоскости (рис. 202).

Угол падения равен углу отражения.

Доказательство при помощи шайбы Гартля (рис. 203): Вращающаяся горизонтальная щель пропускает узкий пучок света, который отражается от плоского зеркала,

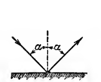


Рис. 202. Отражение от плоского зеркала.

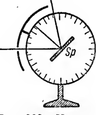


Рис. 203. Измерение угла отражения.

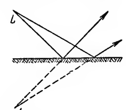


Рис. 204. Возникновение изображения в зеркале.

находящегося в центре шайбы. Отсчитывая положения светового пучка на градусной шкале диска, можно проверить закон отражения.

Выходящие из одной точки L лучи отражаются в плоском зеркале так, как будто они выходят из симметричной, по отношению к зеркалу, точки L' (рис. 204). При отражении в плоском зеркале правая и левая стороны меняются местами.

Зеркала, расположенные под углом в 45°, служат для разметки прямых углов на местности (рис. 205).

$$u = 2\alpha + 2\beta$$
$$\alpha + \beta + 135° = 180°$$
$$u = 90°$$

Рис. 205. Угловое зеркало.

Гладкие поверхности отражают падающие лучи только в одном направлении: *правильное отражение* (у «зеркальных поверхностей»).

Шероховатые поверхности отражают падающие лучи во всех направлениях: *диффузное отражение*. Вследствие диффузного отражения тела делаются видимыми; зеркало, которое полностью отражает, невидимо.

б) Сферические зеркала (вогнутые зеркала)

Небольшой участок поверхности сферического зеркала может рассматриваться как плоский; нормаль в точке падения совпадает с радиусом сферического зеркала. Лучи,

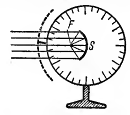


Рис. 206. Отражение параллельных лучей от вогнутого зеркала.

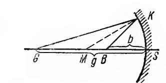


Рис. 207. К выводу уравнения вогнутого зеркала.

параллельные оптической оси, после отражения сходятся практически в одной точке F, *фокусе сферического зеркала* (рис. 206, 207). Последний расположен посередине между центром сферы M и вершиной S вогнутого зеркала. Доказательство при помощи шайбы Гартля:

Фокусное расстояние $F = \frac{r}{2}$.

Формула вогнутого сферического зеркала (рис. 207). Расстояние предмета (светящейся точки G) от вершины S сферического зеркала обозначим буквой g, расстояние изображения B от S обозначим буквой b.

Формула вогнутого сферического зеркала: $\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=\frac{1}{F}$.

Пояснение. На основании теоремы о биссектрисе угла в треугольнике имеем $GM : MB = GK : KB \approx g : b$ для центральных лучей — лучей, падающих вблизи вершины зеркала S,

$(g-r):(r-b)=g:b$; $gb-rb=gr-gb$; $2gb=br+gr$, деля на bgr, получаем:

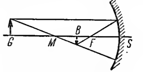
$$\frac{2}{r}=\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=\frac{1}{F}, \text{ так как } F=\frac{r}{2}.$$

Построение изображений в вогнутом зеркале: луч, параллельный оси зеркала, после отражения пройдет через фокус и обратно. Луч, проходящий через центр кривизны, отражается по той же нормали.

Величина предмета G относится к величине изображения B, как расстояние от предмета до центра зеркала к расстоянию от изображения до центра зеркала

$$G:B=(g-r):(r-b).$$

$g>r$: изображение получается уменьшенным, обратным и действительным между центром M и фокусом F (рис. 208).



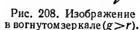


Рис. 208. Изображение в вогнутом зеркале ($g>r$).

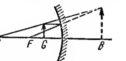


Рис. 209. Изображение в вогнутом зеркале ($g<F$).

$g=r$: изображение равное, обратное, действительное в точке M.

$F<g<r$: изображение увеличенное, обратное, действительное, $b>r$.

$g<F$: изображение увеличенное, мнимое (кажущееся), прямое, $b<0$: увеличительное зеркало (рис. 209).

в) Выпуклые зеркала (рассеивающие)

К сферическим выпуклым зеркалам применимы формулы вогнутых зеркал, только величине F надо приписать знак минус; в фокусе сходятся продолжения лучей, шедших параллельно оси зеркала и рассеянных зеркалом (рис. 210).

Сферические выпуклые зеркала всегда дают прямые, уменьшенные — мнимые изображения и обладают большим полем зрения.

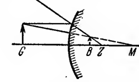


Рис. 210. Изображение в выпуклом зеркале.

г) Параболические зеркала

Параболическое зеркало, в противоположность сферическому, собирает параллельные лучи точно в одной точке. Если источник света расположить в фокусе, то лучи после отражения становятся параллельными. Приближая источник света к вершине зеркала или удаляя его, можно сделать пучок лучей либо расходящимся, либо сходящимся.

4. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ

а) Закон Снеллиуса (1615 г.)

Падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с нормалью, восставленной из точки падения. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная коэффициенту преломления n (ср. II. 3-в).

Закон преломления: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=n$,
n — коэффициент преломления.

Гюйгенс нашел в 1690 г., что коэффициент преломления n равен отношению скоростей распространения света в обеих средах

$$n=\frac{c_1}{c_2}.$$

При переходе луча из среды оптически менее плотной [1]) в среду оптически более плотную преломленный луч приближается к нормали ($n > 1$), при переходе из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную луч отклоняется от нормали ($n < 1$). При этом существует предельный угол $\beta = 90°$ при некотором определенном угле α. Если α превышает это значение, то наступает полное отражение (рис. 211).

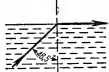


Рис. 211. Предельный угол при полном отражении.

Коэффициенты преломления (округленные значения):

Воздух — вода $^4/_3$, воздух — кронглас $^3/_2$, воздух — флинтглас (стекло, содержащее свинец) $\frac{17}{10}$, воздух — алмаз $\frac{5}{2}$. Отсюда следует: скорость света в воде $c_1 = 225\,000$ *км/сек*, в кронгласе — 200 000 *км/сек*, в флинтгласе — 176 000 *км/сек*, а в алмазе — 120 000 *км/сек*.

Для предельного угла полного отражения ($\beta = 90°$):

$$\sin\alpha = n\,(< 1).$$

б) Следствия и применения. Атмосферное преломление

Вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой звезда вблизи горизонта кажется выше, чем на самом деле: в каждом пограничном слое луч при переходе из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, преломляясь, приближается к нормали. Изогнутый луч попадает в глаз; нам же кажется, что мы видим прямой луч (рис. 212). Наклонно опущенный в воду стержень кажется надломленным.

Рис. 212. Преломление лучей в атмосфере.

[1]) Оптически менее плотной называется среда, в которой свет распространяется быстрее.

Призма полного отражения перевертывает изображение, оборотная призма (рис. 213).



Рис. 213. Обращение изображения призмой полного отражения.

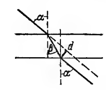


Рис. 214. Отклонение луча плоскопараллельной пластинкой.

Плоскопараллельная пластинка при наклонном падении параллельных лучей дает параллельное смещение лучей (рис. 214).

в) Преломление одноцветных лучей в призме

Угол между плоскостями призмы называется преломляющим углом ω, линия пересечения плоскостей призмы — преломляющим ребром.

Для отклонения δ находим уравнения на рис. 215:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}=n; \quad \beta_1+\alpha_2=\omega;$$

$$\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}=\frac{1}{n}.$$

$$\delta=\alpha_1-\beta_1+\beta_2-\alpha_2=$$
$$=\alpha_1+\beta_2-\omega.$$

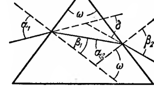


Рис. 215. Ход лучей в призме.

Наименьшее отклонение луч испытывает при симметричном прохождении через призму:

$$\beta_1=\alpha_2=\frac{\omega}{2}; \quad \alpha_1-\beta_1=\beta_2-\alpha_2=\frac{\delta}{2};$$

$$\alpha_1=\beta_1+\frac{\delta}{2}=\frac{\omega}{2}+\frac{\delta}{2}.$$

При минимальном отклонении: $n=\dfrac{\sin\left(\frac{\omega}{2}+\frac{\delta}{2}\right)}{\sin\frac{\omega}{2}}$.

Закон тонких призм (имеет большое значение для линз). Для малых углов:

$$\sin\alpha = \alpha,\ \sin\beta = \beta;\ \alpha_1 = n\beta_1;\ \alpha_2 = \frac{1}{n}\beta_2.$$

$$\delta = n\beta_1 + n\alpha_2 - \omega = n(\beta_1 + \alpha_2) - \omega = (n-1)\,\omega.$$

Тонкая призма: $\delta = (n-1)\,\omega.$

5. РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА НА ЦВЕТА (ДИСПЕРСИЯ)

а) Непрерывный спектр

Белый свет разлагается призмой на *спектральные цвета* (спектр): красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Это распределение «главных» цветов было предложено Ньютоном по аналогии со звуковой гаммой. Между отдельными цветами происходят непрерывные переходы тонов. Красный свет отклоняется

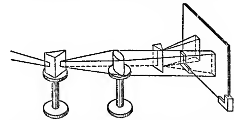


Рис. 216. Обратное собирание спектральных цветов.

меньше всего, фиолетовый имеет наибольший угол отклонения. При помощи цилиндрической линзы можно снова соединить спектральные цвета в белый свет (рис. 216). Следовательно, белый цвет является смесью множества цветных лучей спектра.

Если внести в сходящийся пучок лучей позади цилиндрической линзы вторую (тонкую) призму, то она отклонит часть лучей и на экране появится окрашенное изображение щели, например светло-голубое; неотклоненные лучи дадут второе изображение щели (оранжевое). Эти два пучка лучей дадут совместно белый цвет. Такого рода цвета:

красный и зеленый, оранжевый и светло-голубой, желтый и синий, называются *дополнительными цветами*.

Замечание. Желтый и синий спектральные цвета дают совместно белый; но соединение желтой и синей красок дает зеленый цвет. В последнем случае речь идет об отраженном свете. Желтая краска отражает главным образом оранжевый, желтый и зеленый. Синяя отражает, наоборот, зеленый и синий. В смеси преобладает отраженный зеленый цвет.

Одинаковые призмы из разных сортов стекла дают спектры различной ширины. Комбинируя призмы с различными преломляющими углами, можно уменьшать отклонение и одновременно увеличить ширину спектра *(спектроскоп прямого зрения)*. Комбинируя призмы из кронгласа и флинтгласа с различными преломляющими углами, можно, наоборот, устранить разложение в спектр и сохранить отклонение: *ахроматические призмы*.

б) Типы спектров

Раскаленные твердые тела дают *сплошной спектр*. Последний содержит все спектральные цвета, непрерывно переходящие один в другой. *Накаленные* же *газы* дают *линейчатый спектр*. Число и расположение линий характерно для каждого данного вещества. По расположению спектральных линий *(спектральный анализ)* можно судить о наличии данного вещества даже в удаленных раскаленных телах, например в звездах. Исходящие из накаленных твердых тел или газов лучи образуют спектры испускания *(эмиссионные)* [1].

Если пропустить лучи, исходящие от раскаленного твердого тела, через раскаленные пары (например, пары натрия), то на непрерывном спектре на местах линий, которые присущи спектру испускания данного пара, появляются черные полосы: *спектр поглощения*.

Линии Фраунгофера в солнечном спектре позволяют судить о парах, которые окружают ядро Солнца.

«Обращение» линии натрия. В непрерывном спектре электрической дуги часто можно ясно видеть желтую двойную линию натрия. Она появляется благодаря присутствию

[1]) Эмиттере (лат.) — испускать.

в дуге раскаленных паров натрия. Если такой свет пропустить через более холодные пары натрия, то на месте, где была видна линия натрия, появляется темная полоса. Пары натрия поглотили то излучение, которое они сами испускают.

Закон Кирхгофа и Бунзена. Светящиеся газы поглощают те цвета, которые сами испускают.

6. ЛИНЗЫ И ФОРМУЛЫ ЛИНЗ

а) Типы линз

Оптические линзы, которые в середине толще, чем на краю, называются собирающими; напротив, если край

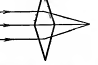


Рис. 217. Двойная призма как собирающая линза.

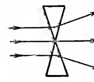


Рис. 218. Двойная призма как рассеивающая линза.

толще, чем середина, то линзы действуют как рассеивающие. По форме поперечного сечения различают: двояковыпуклые, плосковыпуклые, вогнутовыпуклые собирающие линзы; двояковогнутые, плосковогнутые, выпукловогнутые рассеивающие линзы.

Тонкие линзы в первом приближении можно рассматривать как две сложенные тонкие призмы (рис. 217, 218). Ход лучей можно проследить на шайбе Гартля.

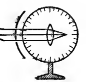


Рис. 219. Соединение параллельных лучей собирающей линзой.

Рис. 220. Рассеяние параллельных лучей рассеивающей линзой.

Собирающая линза концентрирует параллельные лучи в одной точке за линзой, в фокусе (рис. 219).

Рассеивающая линза превращает параллельный пучок лучей в расходящийся пучок, который кажется выходящим из мнимого фокуса (рис. 220).

б) Построение изображения в линзах

Для построения хода луча в линзе применяются те же законы, что и для вогнутого зеркала. Луч, *параллельный оси*, проходит через *фокус* и наоборот. Центральный луч (луч, идущий через оптический центр линзы) проходит через линзу *без отклонения*; в толстых линзах он немного смещается параллельно самому себе (как в плоскопараллельной пластинке, см. рис. 214). Из обратимости хода лучей следует, что каждая линза имеет два фокуса, которые находятся на одинаковых расстояниях от линзы (последнее верно лишь для тонких линз). Для тонких собирающих линз и центральных лучей справедливы следующие *законы построения изображений*:

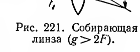


Рис. 221. Собирающая линза ($g > 2F$).

$g > 2F$; изображение обратное, уменьшенное, действительное, $b > F$ (рис. 221).

$g = 2F$; изображение обратное, равное, действительное, $b = 2F$.

$F < g < 2F$; изображение обратное, увеличенное, действительное, $b > 2F$.

$g < F$; изображение прямое, увеличенное, мнимое, $-b > F$ (рис. 222).

При $g < F$ лучи расходятся, их мнимые продолжения пересекаются и дают мнимое изображение. Линза действует как увеличительное стекло (лупа).

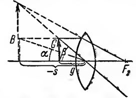


Рис. 222. Собирающая линза ($g < F$).

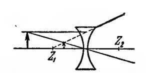


Рис. 223. Рассеивающая линза.

Изображения в рассеивающих линзах всегда мнимые, прямые и уменьшенные (рис. 223).

в) Формула линзы

Для тонких линз и центральных лучей применима

Формула линзы: $\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=\frac{1}{F}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)$.

Фокусное расстояние F зависит от коэффициента преломления стекла и радиусов кривизны линзы.

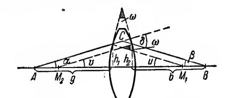


Рис. 224. К выводу формулы линзы.

Вывод формулы (рис. 224): отклонение δ является внешним углом треугольника ABC:

$$\delta=\alpha+\beta \quad \text{согласно закону тонких призм;}$$

$$\delta=(n-1)\,\omega;$$

$$\alpha\approx\operatorname{tg}\alpha=\frac{h_1}{g};\quad \beta\approx\operatorname{tg}\beta=\frac{h_2}{b};$$

$$u\approx\sin u=\frac{h_1}{r_1};\quad v\approx\sin v=\frac{h_2}{r_2};\quad u+v=\omega.$$

После подстановки в выражении для δ получим:

$$\frac{h_1}{g}+\frac{h_2}{b}=(n-1)\left(\frac{h_1}{r_1}+\frac{h_2}{r_2}\right).$$

Для тонких линз $h_1\approx h_2$; следовательно,

$$\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right).$$

Оптическая сила линз измеряется в *диоптриях*. Оптическая сила является обратной величиной фокусного расстояния, измеренного в метрах:

$$D=\frac{1}{F}\ м^{-1}.$$

Исправление недостатков зрения. При дальнозоркости лучи от предмета, попадая в глаз, пересекаются за сетчаткой. Собирающая линза, помещенная перед хрусталиком, приближает изображение, так что оно попадает на сетчатую оболочку. При близорукости лучи, слишком сильно преломленные глазом, не попадают на сетчатку. Рассеивающая линза делает их более расходящимися; тем самым изображение удаляется и попадает на сетчатку.

г) Недостатки линз

1. *Хроматическое искажение* (хроматическая аберрация). Красный луч преломляется меньше фиолетового, вследствие этого края изображения становятся окрашенными.

Исправление: ахроматические линзы состоят: из собирающей линзы из кронгласа и вогнуто-выпуклой линзы из флинтгласа (ср. ахроматическую призму).

2. *Сферическое искажение* (сферическая аберрация). В толстых линзах лучи, прошедшие у краев линзы, сходятся в другой точке, чем лучи, прошедшие ближе к ее центру. Лучи, преломившиеся в линзе, не сходятся в одной точке; вместо изображения предмета (точки) получается размытое пятно. Изображение не четкое. *Исправление*: диафрагмирование краевых лучей.

3. *Искривление плоскости изображения.* У толстых линз поверхность изображения не плоская, это ведет к бочкообразному или подушкообразному искажению. *Исправление:* особая комбинация линз, апланат.

4. *Астигматизм* [1]). Размытие изображения вследствие наклонного падения светового пучка. Комбинация линз, которая исправляет этот недостаток, называется анастигматом.

7. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

а) Проекционный аппарат

В диаскопе расходящиеся лучи сильного источника света (дуги или мощной лампы накаливания) превращаются при помощи конденсора в сходящийся пучок. Диапозитив, расположенный у самого конденсора, пронизывается ши-

[1]) Астигматисмус (греч.) — неточечность.

роким пучком лучей. Линза объектива дает увеличенное, обратное, действительное изображение освещенного диапозитива. Диапозитив должен быть помещен между фо-

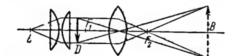


Рис. 225. Ход лучей в проекционном аппарате.

кусным и двойным фокусным расстояниями объектива (рис. 225). В *эпископе* объект освещается сильным боковым источником света. Объектив дает изображение ярко освещенного объекта. Наклонно расположенное на пути лучей зеркало служит для отклонения лучей из вертикальной в горизонтальную плоскость.

б) Лупа и микроскоп

Собирающая линза дает увеличенное, мнимое, прямое изображение предмета, помещенного между фокусом и линзой, она действует в этом случае, как *лупа*.

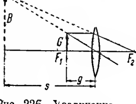


Рис. 226. Увеличение лупы.

При рассмотрении маленьких предметов решающим является угол зрения, под которым их видит глаз. Невозможно различить соседние точки предмета, если они видны под углом зрения, меньшим 50 дуговых секунд. Лупа увеличивает угол зрения; мнимое изображение получается на расстоянии ясного зрения s ($s = 25$ *см* для нормального зрения, рис. 226).

Увеличение $v = \frac{B}{G} = \frac{s}{g}$; $\frac{1}{g} - \frac{1}{s} = \frac{1}{F}$; $\frac{1}{g} = \frac{1}{F} + \frac{1}{s}$;

$g = \frac{fs}{f+s}$; $v = \frac{F+s}{F} = 1 + \frac{s}{F} \approx \frac{s}{F}$.

Микроскоп. Объектив — собирающая короткофокусная линза — дает обратное увеличенное, действительное изобра-

жение маленького объекта (рис. 227). Объект располагается вблизи фокуса [1]); поэтому первое увеличение $v_1 = \frac{B_1}{G} = \frac{l}{F_1}$. Окуляр помещается за изображением и действует подобно

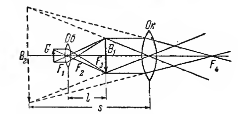


Рис. 227. Ход лучей в микроскопе.

лупе. Второе увеличение $v_2 = \frac{B_2}{B_1} = \frac{s}{F_2}$; поэтому полное увеличение $v = v_1 v_2 = \frac{ls}{F_1 F_2}$. Расстояние $l \approx$ расстоянию между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра.

в) Зрительные трубы

1. *Астрономическая труба* (Кеплер, 1611). Объектив (длиннофокусный) дает действительное изображение весьма удаленной точки (объекта) вблизи фокуса линзы объектива

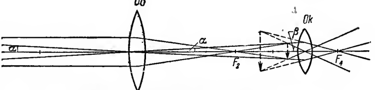


Рис. 228. Ход лучей в астрономическом телескопе (труба Кеплера).

(рис. 228). Последнее рассматривается через собирающую линзу окуляра, которая действует, как лупа. Длина зрительной трубы приблизительно равна сумме фокусных расстояний $F_1 + F_2$; увеличение $v = \frac{F_1}{F_2}$.

[1]) На чертеже G и B_1 сильно увеличены.

Пояснение. Объект виден без зрительной трубы под углом α, при помощи зрительной трубы под углом β:

$$\operatorname{tg}\beta : \operatorname{tg}\alpha = \frac{B_1}{F_2} : \frac{B_1}{F_1} = \frac{F_1}{F_2} .$$

2. *Земная зрительная труба.* Земная зрительная труба представляет собой астрономическую, в которую добавлена оборачивающая линза, перевертывающая первое обратное изображение, не изменяя его величины. Длина зрительной трубы возрастает при этом на учетверенное фокусное расстояние оборотной линзы (рис. 229).

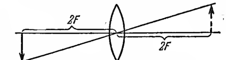


Рис. 229. Действие оборачивающей линзы.

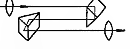


Рис. 230. Ход лучей в призменном телескопе.

3. *Призматическая зрительная труба.* В призматической зрительной трубе оборачивающая линза заменена двумя призмами полного отражения, гипотенузные плоскости которых параллельны, а преломляющие ребра взаимно-перпендикулярны. При этом одновременно с оборачиванием изображения достигается значительное укорочение трубы, так как лучи трижды пробегают путь между призмами (рис. 230). Кроме того, линзы объектива расположены дальше друг от друга, чем глаза, что благоприятствует стереоскопичности.

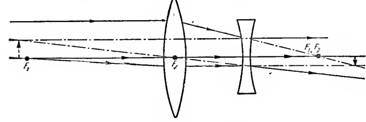


Рис. 231. Ход лучей в трубе Галилея.

4. *Голландская зрительная труба* (Липпершау, 1608), или труба Галилея. Объектив дает уменьшенное, обратное, действительное изображение вблизи фокуса. На пути сходящегося пучка лучей, между объективом и его фокальной плоскостью, располагается рассеивающая линза, которая отклоняет лучи от оптической оси. Глаз видит увеличенное, прямое, мнимое изображение (рис. 231). Длина зрительной трубы приблизительно равна разности фокусных расстояний, увеличение относительно мало. Голландская зрительная труба еще поныне употребляется в качестве бинокля.

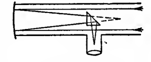


Рис. 232. Ход лучей в отражательном телескопе.

5. *Зеркальный телескоп*. Большое вогнутое зеркало дает уменьшенное изображение удаленного предмета. На пути лучей ставится или наклонное зеркало, или призма полного отражения. Смещенное изображение после увеличения в окуляре попадает в глаз (рис. 232).

Б. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

а) Теории света

В геометрической оптике для вывода основных законов используется прямолинейность распространения световых лучей; при этом не делается никаких предположений относительно природы света.

В XVII и XVIII столетиях противопоставлялись две равноправные теории. Ньютон предполагал, что световые лучи создаются испусканием мельчайших световых частиц (световых корпускул); исходя из этой теории, он мог объяснить почти все известные в то время оптические явления (*эмиссионная* или *корпускулярная* теория). Гюйгенс считал, что свет является волновым движением (*волновая* теория света). На основе этого предположения оказалось возможным вывести законы геометрической оптики (ср. II. 3). После того как удалось открыть явление интерференции света, аналогичное явлениям интерференции звука, вопрос

о природе света был решен в пользу волновой теории. Впервые в наше время обе теории были признаны в известной степени равноправными (ср. VI. 2-b).

б) Интерференционный опыт Френеля [1]) (опыт с зеркалами)

В 1822 г. Френель доказал существование явления интерференции для света:

Свет плюс свет может дать темноту. (Ср. интерференционные опыты Квинке со звуковыми волнами II. 7-б.)

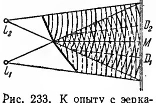


Рис. 233. К опыту с зеркалами Френеля.

Условием для возникновения интерференции являются два близко расположенных *когерентных источника света*, т. е. такие источники света, которые испускают полностью однородные лучи с постоянной разностью фаз. Волны, излученные двумя различными источниками света, всегда некогерентны. Поэтому Френель использовал один источник света и получал два его зеркальных изображения. Последние удовлетворяют условию когерентности. Зеркала Френеля представляют собой два плоских зеркала, образующих угол, лишь на несколько минут меньший 180°. Источник света, отражаясь в этих зеркалах, дает два близко расположенных отражения L_1 и L_2. Лучи, выходящие из этих изображений, дают на удаленном экране темные и светлые полосы, полосы гашения $\left(\text{разность хода } (2n-1)\frac{\lambda}{2}\right)$ и полосы усиления света (разность хода $n\lambda$) (рис. 233). По расстоянию между темными и светлыми полосами в середине интерференционной картины можно определить длину волны света (рис. 234).

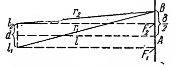


Рис. 234. Определение длины волны.

$$\boxed{\lambda = \frac{\delta d}{l},}$$

[1]) О. Френель — французский физик (1788—1827).

δ — расстояние между двумя первыми темными полосами, d — расстояние между (кажущимися) источниками света, l — расстояние от экрана до источника света.

Пояснение.

$$r_1^2 = l^2 + \left(\frac{\delta}{2} + \frac{d}{2}\right)^2,$$
$$r_2^2 = l^2 + \left(\frac{\delta}{2} - \frac{d}{2}\right)^2,$$
$$r_1^2 - r_2^2 = (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) = \delta d,$$
$$r_1 + r_2 \approx 2l;$$

следовательно, $r_1 - r_2 = \frac{\delta d}{2l}$.

Гашение волн наступает при разностях хода $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}$. Поэтому для первой темной полосы получается:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\delta d}{2l}, \quad \text{следовательно,} \quad \lambda = \frac{\delta d}{l}.$$

Для желтого света натрия получается $\lambda = 0{,}000589$ *мм* = = 589 *мμ*. Если используется белый свет, то светлые полосы окрашены. Каждая длина волны дает полосу на соответствующем расстоянии от середины. Эти цвета частично перекрываются.

в) Длины световых волн

Каждый цвет в однородной среде соответствует определенной длине волны, а следовательно, и частоте колебаний. При переходе в другую среду длина волны может измениться, в то время как частота не меняется.

Длины световых волн

Цвета	Красный	Оранжевый	Желтый	Зеленый	Голубой	Синий	Фиолетовый
Линии Фраунгофера	*A*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*
λ в *мμ* [1])	761	656	589	527	486	431	397

[1]) Длины световых волн выражаются также в единицах Å: 1 Å = 0,1 *мμ*.

Из основного уравнения волновой теории $c = f\lambda$ следуют *значения частот:* $400 \div 750$ триллионов (10^{12}) *гц*. Видимый свет едва охватывает одну октаву, в то время как ухо воспринимает от 10 до 11 октав.

г) Цвета тонких пленок

Цвета тонких пленок (масляная пленка на воде, мыльный пузырь) объясняются явлениями интерференции.

Опыт. Мыльная пленка в проволочной рамке, освещенная однородным светом, дает параллельные светлые и темные полосы; в белом свете полосы окрашены во все цвета радуги.

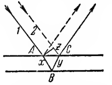


Рис. 235. Цвета тонких пластинок.

Пояснение (рис. 235). Лучи *1* и *2* падают на плоскопараллельную пластинку. Луч *1* в точке A частично отражается, частично преломляется и попадает в точку B; здесь, на границе сред, снова отражается (в той же фазе, т. е. без потери $\frac{\lambda}{2}$), попадает в точку C и интерферирует с отраженной частью луча *2*. Последний в точке C отразился с потерей $\frac{\lambda}{2}$ от среды, оптически более плотной. Если в направлении отраженных лучей *1* и *2* получается темнота, то разность хода $= \frac{\lambda}{2}$ или нечетному числу $\frac{\lambda}{2}$. Отсюда следует: разность длин световых путей $x + y - z$, увеличенная на $\frac{\lambda}{2}$ (вследствие отражения луча *2*), будет равна $(2n + 1)\frac{\lambda}{2}$. В проходящем свете интерферируют луч *1*, дважды отразившийся от тонкой пленки, и дважды преломлявшийся луч *2*. Добавочная разность хода в $\frac{\lambda}{2}$ вследствие отражения от более плотной среды отпадает

$$x + y - z = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Явления в отраженном свете и в проходящем свете взаимно дополняют друг друга [1]).

[1]) Здесь не учтено различие скоростей распространения в обеих средах. *(Прим. перев.)*

д) Кольца Ньютона

Плосковыпуклая линза с очень малой кривизной лежит на стеклянной пластинке. Если ее осветить перпендикулярным пучком однородных лучей, то вокруг темного центра появляется система светлых и темных концентрических окружностей. Явление интерференции получается вследствие отражения перпендикулярного луча в точке B (на поверхности линзы, от среды менее плотной) и в точке C (от стеклянной пластинки, среды оптически более плотной) (рис. 236); распределение света и темноты зависит от толщины воздушного клина.

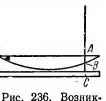


Рис. 236. Возникновение колец Ньютона.

Пояснения и измерения. ρ — радиус n-го темного кольца, d — толщина воздушного слоя. Из геометрических соображений имеем $\rho^2 = d(2r - d) \approx 2rd$, так как d по отношению к r очень мало (рис. 237). Для темноты разность хода равна $2d + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$; $2d = n\lambda$; $\lambda = \frac{2d}{n}$. Из выражения $\rho^2 = 2rd$ следует $2d = \frac{\rho^2}{r}$, т. е. $\lambda = \frac{\rho^2}{rn}$. Так как ρ и r могут быть непосредственно измерены, можно определить λ. Середина системы колец темная, так как, хотя в этом случае точки B и C совпадают, но одно отражение происходит от менее плотной среды, а другое — от более плотной.

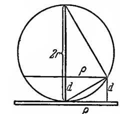


Рис. 237. Определение длины волны по кольцам Ньютона.

Расстояние между окрашенными кольцами зависит от цвета; кольца красного цвета отстоят друг от друга дальше, чем кольца голубые. Кольца Ньютона можно также наблюдать в проходящем свете. Цвета в проходящем свете являются дополнительными к цветам в отраженном свете.

Если поместить между пластинкой и линзой какую-нибудь жидкость, то положение колец изменится (ρ станет меньше). Из отношения обоих значений λ для одного цвета (одинаковая частота) можно определить скорость света в жидкости.

2. ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

а) Дифракция от тонкой проволоки

Явления дифракции также подтверждают волновую природу света.

Опыт. Свет дуговой лампы проходит через щель и цветной фильтр. При помощи собирающей линзы на удаленном экране получается изображение щели. Если ввести в узкий пучок лучей тонкую проволоку, то в изображении щели появляется ее тень. Изображение щели и тень становятся нерезкими; в середине тени появляется светлая полоска, окруженная темными и светлыми полосами, которые к краям расположены теснее (дифракционные линии). При освещении белым светом эти полосы окрашены.

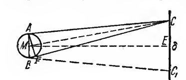


Рис. 238. Дифракция от тонкой проволоки.

Пояснение (рис. 238). Пусть первоначальный фронт волны параллелен диаметру проволоки AB. Рассмотрим условия освещения точки E, лежащей на прямой, проходящей через центр проволоки. Так как проволока задержала лишь малые симметричные участки фронта волны AM и MB, то из оставшихся частей волнового фронта придут симметричные пары лучей с нулевой разностью хода и в точке E получится свет. Для боковых точек, например C_1 или C, симметрия нарушается. Поэтому по обе стороны точки E получается чередование темных и светлых полос.

б) Дифракция от щели

При прохождении света через очень узкую щель за щелью также получаются дифракционные полосы. Здесь интерферируют отдельные лучи, проходящие через щель. В зависимости от наклона лучей к оси симметрии получаются неодинаковые разности хода, а следовательно, попеременно светлые и темные полосы. Если за щелью поставить собирающую линзу и наблюдать картину в фокальной плоскости, то на оптической оси линзы получим свет,

так как лучи, идущие перпендикулярно к щели, не дадут разности хода. Наклонный пучок дает разность хода. Если его можно разбить на 2, 4,... группы (рис. 239), так что разность крайних лучей двух соседних пучков (например, A и d) равна $\lambda/2$, то действия групп попарно уничтожатся и в данном направлении получится темнота. Если же такое

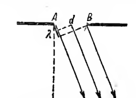


Рис. 239. Дифракция от щели.

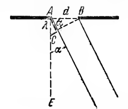


Рис. 240. Определение длины волны по ширине щели.

разбивание возможно на 3, 5,... групп, то действие четного числа групп уничтожится, но действие одной группы останется. На экране (в фокальной плоскости) получатся чередующиеся светлые и темные полосы, причем яркость полос убывает по мере удаления от оптической оси линзы.

Вычисление длины волны по известной ширине щели (рис. 240). Пусть в направлении α получается первая темная полоса. Тогда разность хода между крайними лучами всего пучка равна λ. Но из треугольника ABC получаем:

$$\sin\alpha = \frac{\lambda}{d}, \quad \text{следовательно,} \quad \lambda = d\sin\alpha.$$

в) Дифракционные решетки и дифракционные спектры

Дифракционные решетки получают, нанося делительной машиной очень узкие параллельные штрихи на гладкую стеклянную пластинку; неповрежденные места стекла действуют, как щели, поцарапанные — как непрозрачные полосы. При использовании дифракционной решетки вместо одной щели дифракционная картина получается гораздо более яркой, так как в этом случае интерферируют лучи не от одной щели, а все соответствующие лучи от многих щелей.

Расстояние между двумя прозрачными промежутками называется *периодом решетки* b (сумма ширины щели и непрозрачного промежутка, рис. 241).

Хорошие решетки имеют до 1700 штрихов на 1 *мм* длины. Первый светлый максимум получается при разности хода соответственных лучей (идущих от соседних щелей), равной λ:

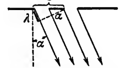


Рис. 241. Измерения с дифракционной решеткой.

$$\sin\alpha_1 = \frac{\lambda}{b}.$$

Из этого уравнения можно вычислить λ.

Дифракционные решетки применяются для получения ярких и широких спектров. Вследствие того, что красный цвет имеет наибольшую длину волны, а фиолетовый — наименьшую, *красная часть спектра отклонена больше фиолетовой*, как это можно видеть из предыдущей формулы. При малых углах отклонение пропорционально

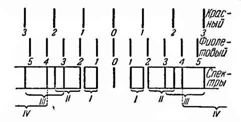


Рис. 242. Дифракционные полосы и дифракционные спектры.

длине волны. На этом основании дифракционные спектры называются *нормальными спектрами* в противоположность *дисперсионным* спектрам призмы, в которых красная часть спектра отклоняется меньше фиолетовой и в которых α непропорционально λ. Спектры высших порядков частично перекрываются (рис. 242).

г) Явления дифракции в природе

Тонкий слой облаков из водяных капелек, закрывающий солнце или месяц, действует, как дифракционная решетка. Светило кажется окруженным разноцветным вен-

цом (радужным ореолом). В случае игольчатых, ледяных облаков получается другое явление: узкое кольцо большого радиуса вокруг солнца или луны. Оно возникает вследствие преломления света.

Опыт. Если рассматривать пламя свечи через запотевшее стекло или через стекло, посыпанное очень мелким порошком, то пламя кажется окруженным радужным ореолом. Радуга возникает в основном вследствие преломления и полного отражения солнечных лучей в шарообразных каплях дождя. Радуга состоит из спектра, расположенного таким образом, что внешняя сторона дуги окрашена в красный цвет, а внутренний край — в фиолетовый цвет; от внешнего края до фиолетового располагаются все остальные цвета спектра. Радиус полукруга виден под углом зрения в 42,5°. Побочная радуга имеет внутренний радиус, видный под углом в 51°, и окрашена изнутри в красный цвет, а снаружи в фиолетовый.

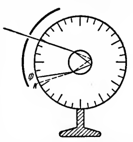


Рис. 243. Модельный опыт для пояснения возникновения радуги.

Модельный опыт: получение радуги при помощи шайбы Гартля (рис. 243).

3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Решение вопроса: является ли свет продольным или поперечным колебанием, дается установлением факта поляризации световых волн. Только поперечные колебания могут быть поляризованы (ср. II. 2-в).

а) Поляризация в кристалле турмалина

Турмалиновая пластинка вырезается таким образом, что ограничивающие ее плоскости параллельны главной кристаллографической оси. Свет проходит через пластинку, претерпевая незначительное ослабление. За пластинкой световые колебания происходят только в одной плоскости, они *линейно поляризованы.*

Проверка этого осуществляется при помощи второй подобной же турмалиновой пластинки, которая устанав-

ливается параллельно первой, но поворачивается в своей плоскости на 90°. Первая пластинка T_1 называется *поляризатором*, вторая T_2 — *анализатором*, так как она служит для определения плоскости колебаний (рис. 244).

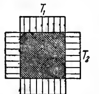


Рис. 244. Скрещенные турмалиновые пластинки.

В естественном свете возможны колебания во всех направлениях, перпендикулярных к направлению распространения; изменения направлений колебаний происходят очень быстро и беспорядочно. В линейно поляризованном свете, вышедшем из первой пластинки, колебания происходят только в одной плоскости. Второй кристалл, оптическая ось которого перпендикулярна к оптической оси первого, полностью гасит колебания (скрещенные поляризаторы).

Теперь вместо кристаллов турмалина применяются искусственно изготовляемые *поляроиды*.

б) Поляризация путем отражения и преломления

Когда свет отражается от диэлектрика под определенным углом (*угол поляризации*), от 50° до 60°, возникает линейная поляризация. Луч, падающий на стеклянный кубик под углом поляризации, частично отражается, частично преломляется. Преломленный луч частично поляризован; в нем преобладают колебания в плоскости, перпендикулярной к плоскости колебаний отраженного луча (рис. 245). Доказательство можно получить, рассматривая луч через анализатор.

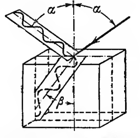


Рис. 245. Поляризация при отражении и преломлении.

Закон Брюстера [1]) (1815). Угол полной поляризации α зависит от показателя преломления. При этом отраженный и преломленный лучи взаимно-перпендикулярны;

$$\operatorname{tg} \alpha = n.$$

[1]) Брюстер, 1781—1861, шотландский физик.

Пояснение формулы. $\beta = 90° - \alpha$; $\sin\alpha : \sin(90° - \alpha) = \operatorname{tg}\alpha = n$. Поляризованный свет служит для исследования кристаллических структур, для нахождения дефектов при варке стекла (при быстром охлаждении).

Прибор Норренберга для исследования поляризации (рис. 246): в качестве поляризатора P применяется стеклянное зеркало, а анализатора A — черное зеркало.

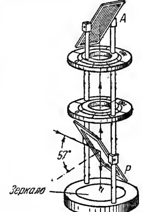


Рис. 246. Поляризационный аппарат.

в) Тиндалевский эффект [1])

Если белый свет проходит через мутную среду, например дым, туман или разбавленное водой молоко, то он сильно рассеивается во все стороны, вследствие чего мелкие взвешенные частицы становятся видимыми. Свет с меньшей длиной волны рассеивается сильнее. Рассеянный свет представляет собой главным образом коротковолновые лучи (синяя часть спектра); кроме того, эти лучи частично поляризованы. Синий свет неба также частично поляризован, мельчайшие неоднородности атмосферы вызывают явление рассеяния. При этом рассеиваются главным образом более короткие синие лучи, а не длинноволновые красные. В проходящем свете (горизонт при закате солнца или на восходе солнца) преобладают желтые и красные лучи, так как синяя часть спектра сильнее рассеивается.

г) Вращение плоскости поляризации

Кварцевые пластинки обладают свойством вращать плоскость поляризации. Направления колебаний образуют в кварце винтовую поверхность; величина углов вращения зависит от толщины кварцевой пластинки, а также и от длины волны света; существуют два сорта кварцев: левовращающий и правовращающий. Подобным же свойством

[1]) Тиндалль, 1820—1891, английский физик и альпинист.

обладают виннокаменная кислота и растворы сахара. По величине вращения можно определить концентрацию раствора сахара *(сахариметр)*.

4. ДВОЙНОЕ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ

а) Свойства исландского шпата

Кристаллы исландского шпата имеют форму ромбоэдра. Если положить кристалл исландского шпата на страницу с напечатанным текстом, то текст представляется раздвоенным. При вращении кристалла над строчкой происходит вращение одного изображения вокруг другого.

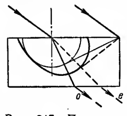


Рис. 247. Пояснение двойного преломления по Гюйгенсу.

Объяснение Гюйгенса. В исландском шпате распространяются две элементарные волны; одна из них, сферическая волна, подчиняется закону преломления, и ей соответствует *обыкновенный луч*; вторая имеет эллиптическую форму, и ей соответствует *необыкновенный луч*. Последний не лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью в точке падения. Обыкновенный луч преломляется сильнее, чем необыкновенный. Оба луча поляризованы взаимно-перпендикулярно (рис. 247).

б) Призма Николя

Николь (1768—1851) использовал свойство исландского шпата, чтобы сконструировать весьма эффективный поляризатор. Призма из исландского шпата разрезается по диагонали, основания подшлифовывают так, чтобы они образовали с ребрами углы в 68 и 90°. Оба куска склеиваются по плоскости распила канадским бальзамом и помещаются в зачерненную изнутри трубку (рис. 248). Обыкновенный луч претерпевает полное отражение

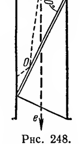


Рис. 248. Призма Николя.

на границе кристалл — канадский бальзам и поглощается зачерненной поверхностью трубки; необыкновенный луч

проходит через призму и выходит поляризованным. Призмы Николя применяются в поляризационных приборах, так как поляроиды неодинаково эффективны для лучей различного цвета.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УСЛОВИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА

а) Опыт Фарадея (1845 г.)

Явление поляризации доказывает, что свет представляет собой поперечные колебания. Можно провести аналогию между распространением световых и электромагнитных волн в вакууме. *Фарадей* доказал справедливость предположения о существовании связи между световыми колебаниями и электрическими процессами при помощи следующего опыта.

В сердечнике сильного электромагнита просверливались отверстия, через эти отверстия пропускался пучок поляризованных лучей. Между полюсами электромагнита помещалась трубка с сероуглеродом (CS_2), и анализатор устанавливался на темноту. При включении электромагнита поле зрения просветлялось. Магнитное поле сообщает сероуглероду способность вращать плоскость поляризации световых колебаний.

б) Эффект Керра

В 1873 г. *Керр* открыл подобное же действие электрического поля. Нитробензол и сероуглерод — непроводники; в нормальном состоянии свет проходит через них без двойного лучепреломления. В сильном электрическом поле они становятся двоякопреломляющими. Ячейка Керра получила техническое применение в фототелеграфии и в телевидении. Она позволяет практически безынерционно воздействовать электрическими колебаниями на световые.

в) Эффект Зеемана [1]

Если внести натриевое пламя в промежуток между полюсами сильного электромагнита, то можно обнаружить в спектроскоп большой разрешающей силы, что произошло

[1] Зееман, 1866—1943, профессор физики в Лейдене.

расщепление линии натрия (желтой) на две или на три отдельные линии [1]). Согласно электронной теории, развитой *Лорентцем*, световое излучение атома натрия связано с колебаниями электронов вокруг ядра атома натрия. Магнитное поле изменяет орбиты электронов. В пространстве, свободном от вещества, сильнейшие магнитные и электрические поля не влияют на распространение света. В пространстве же, заполненном веществом, как это показывают опыты, они влияют. Тот факт, что электромагнитные волны распространяются со скоростью света, наводит на мысль, что свет и электромагнитные волны имеют одну природу и различаются только длинами волн.

[1]) В зависимости от условий наблюдения — вдоль или поперек магнитного поля. (*Прим. перев.*)

V. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

А. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Название электричество происходит от слова янтарь (греч. электрон), который при натирании шерстяной тряпкой приобретает свойство притягивать легкие тела (обрезки бумаги, волосы). Так как у нас нет органа чувств для восприятия электричества, то при описании электрических явлений мы широко пользуемся сравнениями. Действия статических электрических зарядов сравниваются с силами взаимного притяжения двух масс; гравитационному полю сопоставляется электрическое поле. Действия движущихся зарядов сравниваются с действием водяного тока (электрический ток, напряжение сопоставляется с падением давления, сопротивление — с поперечным сечением струи).

а) Притяжение и отталкивание

Эбонитовая палочка, натертая шерстью, а также стеклянная палочка, натертая шелком, проявляет те же свойства, что и янтарь. Мы представляем себе, что эти тела после натирания приобретают электрический заряд; заряды могут быть перенесены на другие тела. Для доказательства служит «электрический маятник» — посеребренный шарик из сердцевины бузины, подвешенный на шелковой нити. При соприкосновении его с палочкой часть заряда перейдет на пробный шарик и последний оттолкнется.

Если свободно подвесить натертую эбонитовую палочку и поднести к ней вторую, также наэлектризованную, то первая оттолкнется; если приблизить наэлектризованную стеклянную палочку, то она притянется. Отсюда заключили,

что существуют два рода электричества, и произвольно установили:

Заряд, приобретаемый *стеклянной* палочкой, считать *положительным*, а заряд, полученный на *эбоните* — *отрицательным*.

Эти утверждения впоследствии оказались не совсем точными. Теперь нам известно, что электричество имеет атомную структуру и что существует только один род свободного электричества — отрицательные электроны. Поэтому положительный заряд какого-нибудь тела представляет собой недостаток электронов, отрицательный — избыток.

Одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименно заряженные — притягиваются.

б) Электроскоп

Существуют вещества, в которых заряды остаются неподвижными (*непроводники* или изоляторы), и вещества, в которых они свободно перемещаются (*проводники*). Металлы являются хорошими проводниками электричества; янтарь, стекло, эбонит и различные искусственные материалы — плохими, они называются изоляторами.

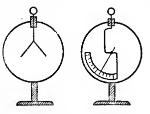


Рис. 249. Электроскоп. Рис. 250. Электрометр.

Для обнаружения электрического заряда служат электроскопы. В электроскопе висят два легких алюминиевых или станиолевых листочка, которые прикреплены к металлическому стержню, проходящему через янтарную пробку в стеклянный сосуд (рис. 249). Если к головке электроскопа прикоснуться заряженным телом, то листочки разойдутся, так как оба заряжаются одноименно и вследствие этого отталкиваются. Электрометр представляет собой электроскоп, проградуированный в вольтах (рис. 250). Для конденсирования больших количеств электричества служат изолированные металлические тела.

в) Электризация при трении

Незаряженное тело содержит одинаковые количества отрицательных и положительных зарядов, которые взаимно нейтрализуются. Посредством трения, а иногда только прикосновением заряды разделяются. Стеклянная палочка становится положительной, а шелковая материя заряжается отрицательно.

Электричество трения возникает посредством разделения положительных и отрицательных зарядов.

Электрический заряд создает в пространстве состояние напряжения, которое передается и на другие удаленные тела:

Электрические заряды создают в окружающем пространстве электрическое поле.

Напряженность электрического поля мы считаем пропорциональной тому силовому воздействию, которое испытывает пробный шарик в данной точке пространства. Это воздействие в воздухе мало отличается от воздействия в пустоте.

2. ЗАКОН КУЛОНА

За одну электростатическую единицу заряда (1 СГС-заряда) принимается такой заряд, который отталкивает равный ему заряд на расстоянии 1 *см* с силой в 1 дину.

$3 \cdot 10^9$ единиц заряда называют кулоном (1 *к*).

Для определения электрического заряда применяют только отталкивание, а не притягивание, так как и нейтральные тела притягиваются.

Закон Кулона (1785): $F = K\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ (дин).

Сила взаимодействия двух точечных зарядов в свободном от вещества пространстве пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Величина K зависит от выбора единиц. Здесь Q определено таким образом, что $K = 1$.

Опыт с электрическим маятником (рис. 251). Сила отталкивания двух одноименных зарядов, расположенных на маятнике и изолированном шаре, равняется горизонтальной силе, обусловленной весом маятника и натяжением его нити, стремящейся возвратить маятник в начальное положение.

Рис. 251. Электрический маятник.

3. ЛИНИИ ПОЛЯ И НАПРЯЖЕНИЕ

Действие на расстоянии электрического заряда мы объясняем наличием электрического поля, по аналогии с действием сил тяготения в гравитационном поле. Закон Кулона дает возможность определить величину и направление действующей силы в любой точке.

> Электрическое поле в любой точке дает представление о величине и направлении действующей силы.

Наглядное изображение поля в *модельном опыте*: станиолевые листочки на стеклянной пластинке представляют собой проводники; их заряжают. Насыпанные на стеклянную пластинку мелкие кристаллики гипса располагаются

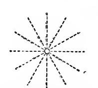


Рис. 252. Линии напряженности уединенного заряда.

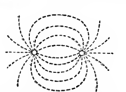


Рис. 253. Линии напряженности двух равных противоположных зарядов.

в направлении действующих сил и демонстрируют распределение линий поля.

На рисунках изображено:

1. Разрез электрического поля одиночного металлического шарика (рис. 252).

2. Поле двух равно и противоположно заряженных шариков (рис. 253).

3. Поле двух равно и одноименно заряженных шариков (рис. 254).

4. Поле двух равно и противоположно заряженных пластин (плоский конденсатор, рис. 255).

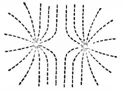


Рис. 254. Линии напряженности двух равных одноименных зарядов.

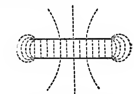


Рис. 255. Линии напряженности двух пластин, несущих равные противоположные заряды.

Напряженность поля в какой-либо точке обозначают буквой E; она определяет силу, действующую на единицу положительного заряда:

$$E = \frac{F}{Q_1} = \frac{Q}{r^2}.$$

Напряженность поля = силе, отнесенной к единице заряда.

Плоская поверхность S пронизывается потоком напряженности $ES \cos(E, n)$, где n обозначает нормаль к плоскости S. Линии поля выходят из заряда (произвольно считают, что из положительного заряда) и входят в отрицательный. Вдоль линий поля мы предполагаем наличие натяжения, поперек линий — поперечное давление. Предположение о наличии поперечного давления связано с тем, что линии не сливаются вместе, несмотря на их натяжение. Натяжение и поперечное давление не должны рассматриваться как механические силы.

Вследствие наличия заряда пространство приходит в состояние электрического возбуждения; *заряд обладает потенциальной энергией*. Разность потенциалов между двумя точками проявляется в господствующем между этими

двумя точками напряжении. Чтобы переместить заряд против этого напряжения, нужно совершить работу, как при подъеме груза в поле тяготения.

Единицей напряжения поля U является $\frac{1 \text{ эрг}}{1 \text{ СГС-заряда}}$.

Практической единицей напряжения является

$$1\ в = \frac{1 \text{ эрг}}{300 \text{ СГС-заряда}}.$$

$$\boxed{1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}} = \frac{10^7 \text{ эргов}}{3 \cdot 10^9 \text{ СГС}} = \frac{1 \text{ эрг}}{300 \text{ СГС}}.}$$

Работа, необходимая для перемещения заряда Q между двумя точками, находящимися на расстоянии h и с разностью потенциалов U, равна

$$\boxed{A = QU.}$$

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{Fh}{Q} = \frac{EQh}{Q}; \qquad \boxed{E = \frac{U}{h}.}$$

Напряженность поля выражается в *в/см*.

Измерителями напряжения служат проградуированные в вольтах электрометры.

4. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ (ИНДУКЦИЯ) И ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА

«Возбуждение» электрических зарядов натиранием стеклянной палочки состоит в разделении зарядов на противоположные по знаку. Положительный заряд остается связанным со стеклом, а отрицательный переходит на шелковую материю. В проводниках же заряды свободно перемещаются. Если приблизить к нейтральному изолированному металлическому телу положительно заряженную стеклянную палочку, то между палочкой и телом возникает электростатическое поле. Вследствие натяжения силовых линий свободно перемещающийся отрицательный заряд располагается на ближайшей к палочке стороне проводника, оттолкнувшееся положительное электричество — на удаленном конце: происходит электризация через влияние, индук-

ция [1]) (рис. 256). Свободный положительный заряд можно отвести в землю посредством прикосновения пальцем к проводнику. При удалении стеклянной палочки (сначала пальцев, затем палочки!) ничем не связанный отрицатель-

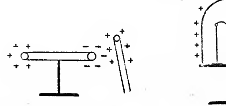


Рис. 256. Электрическое влияние (индукция).

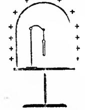


Рис. 257. Опыт с клеткой Фарадея.

ный заряд распределяется по всему проводнику. Если проводник не шаровой формы, а, например, яйцеобразный, то оказывается, что заряд распределяется по поверхности неравномерно. Внутренняя часть проводников свободна от зарядов.

Опыт Фарадея с клеткой (рис. 257). На изолированную тарелку ставится «электрический» маятник и накрывается

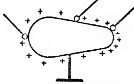


Рис. 258. Распределение заряда на проводнике.



Рис. 259. Действие острия: «электрический ветер».

колоколом из проволочной сетки. Даже если сетка очень сильно заряжена, маятник не обнаруживает внутри никаких зарядов. Заряды расположены на внешней поверхности. На выступах наибольшей кривизны и плотность зарядов больше. Опыт с перенесением зарядов пробным шариком на электрометр (рис. 258). На острие заряды достигают такой плотности, что стекают в воздух: «электрический ветер» (рис. 259). Насаженное острие заменяет пальцы

[1]) Индукцио (лат.) — наведение.

при заряжении через влияние. С острия стекает свободный заряд, в то время как другой заряд связан близостью индуцирующего тела. Применение в *электрических машинах с трением:* отсасывающие гребенки.

На явлении влияния основана *индукционная электростатическая машина* (*Теплер* и *Гольц*, 1867).

На подобном же принципе работает *высоковольтная машина Ван де Граафа*, которая дает напряжение до 10 миллионов вольт (рис. 260). На полом цилиндре в несколько метров высоты, изготовленном из хорошего изолятора (текстолита), укреплен полый металлический шар. Внутри цилиндра движется бесконечная шелковая лента, приводимая в движение двумя шкивами; лента благодаря действию нижнего острия заряжается и служит для переноса зарядов внутрь шара; с помощью второго острия она сообщает заряд шаровому проводнику.

Рис. 260. Генератор высокого напряжения по Ван де Граафу.

5. ЕДИНИЦА ЗАРЯДА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЗАРЯД

На основании закона Кулона и выбора элементарной единицы механической силы (1 дины) установлена единица заряда. В дальнейшем, когда выяснилось, что электричество, подобно веществу, состоит из «атомов электричества», при помощи крайне точных измерений пытались определить заряд этого атома электричества (1910, *Эренгафт* и *Милликен*). Мельчайшие взвешенные в неподвижном воздухе частички (капельки масла) падают под действием силы тяжести медленно, даже если они электрически заряжены. Если их внести в пространство между двумя противоположно заряженными пластинками (в плоский конденсатор) так, чтобы электрическое поле было направлено противоположно силе тяжести, то частички остаются во взвешенном состоянии. Поперечное сечение частичек и напряжение можно измерить. Из уравнения: электрическая сила равна весу, может быть вычислена ве-

личина заряда. Позднейшие точные измерения в опытах Милликена со взвешенными частицами дали следующие результаты:

Электрический заряд представляет собой целое кратное значение элементарного электрического заряда.

Элементарный заряд $e = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ СГС-заряда,
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона.

Свободный отрицательный элементарный заряд называется электроном. Положительный заряд в большинстве случаев связан с атомами вещества и может рассматриваться как недостаток электронов.

6. ЕМКОСТЬ

а) Основные понятия и единица измерения

Напряжение шарового проводника растет пропорционально подведенному заряду.

Сравни с футбольным мячом: чем больше накачивается воздуха, тем больше напряжение оболочки; чем больше мяч, тем больше нужно воздуха, чтобы достичь того же напряжения.

Емкость проводника характеризуется величиной заряда, которая необходима для того, чтобы повысить напряжение его на 1 вольт.

Емкость 1 кулон/1 вольт называется фарадой (в честь *Фарадея*), $C = \frac{Q}{U}$.

1 фарада (*ф*) — очень большая единица. Этой емкостью обладает шар радиусом $9 \cdot 10^{11}$ *см*.

1 микрофарада (1 *мкф*) = 1 миллионной доле фарады;
1 пикофарада (1 *пф*) = 10^{-12} фарады.

Величина 1 *мкф* соответствует шаровому проводнику с радиусом 9 *км*, это значит, что если этому шару сообщить заряд в 1 *к*, то его потенциал будет равен 10^6 *в*.

В радиотехнике обычно принято выражать емкость в *см*: шар радиусом в *r см* обладает емкостью *r см*; 1 *ф* = $9 \cdot 10^{11}$ *см*.

б) Конденсаторы

Две плоские пластинки, между которыми существует электрическое поле, представляют собой конденсатор; они служат для накапливания зарядов, которые взаимно связаны. Если зарядить одну пластинку, а другую заземлить, то на заземленной пластинке возникает равный и противоположный заряд (рис. 261). В прежнее время в качестве конденсатора применялась *лейденская банка*. Внешняя обкладка заземлена, внутренняя обкладка соединена проводником с шариком (рис. 262).



Рис. 261. Плоский конденсатор.

Большей емкостью обладает *пластинчатый конденсатор* (рис. 263); переменной емкостью — *вращающийся конденсатор*. Емкость вращающегося конденсатора увеличивается, когда обе системы пластинок сдвинуты.

Технические бумажные конденсаторы состоят из парафинированной бумаги и двух станиолевых полосок, которые свернуты вместе и образуют конденсатор. Снаружи они обернуты изолирующим материалом.

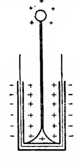


Рис. 262. Лейденская банка.

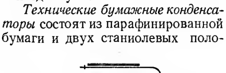




Рис. 263. Пластинчатый конденсатор.

Плоский конденсатор. Изучение конденсаторов с пластинками различной площади S и при различных расстояниях h между пластинками показало, что емкость растет с увеличением площади пластин, а с увеличением расстояния между ними — уменьшается,

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{4\pi h} \ \textit{см},$$

ε_0 обозначает коэффициент пропорциональности, который за-

висит от выбора единиц. Если S измеряется в *см*², а h в *см*, то

$$\varepsilon_0 = 1.$$

ε_0 называется *абсолютной диэлектрической постоянной вакуума*.

Параллельное соединение увеличивает емкость конденсаторов, так как при параллельном соединении возрастает площадь пластин (рис. 264) $C = C_1 + C_2$.

Последовательное соединение конденсаторов уменьшает

Рис. 264. Параллельное соединение конденсаторов.

Рис. 265. Последовательное соединение конденсаторов.

общую емкость, так как теперь расстояние h между пластинками увеличивается (рис. 265)

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Пояснение.

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}, \text{ следовательно, } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

7. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРОСТРАНСТВЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ВЕЩЕСТВОМ

Если поместить между пластинами заряженного плоского конденсатора толстую стеклянную пластинку (рис. 266), то напряжение падает; нужно сообщить больший заряд, чтобы восстановить прежнее напряжение. В стеклянной пластинке, вследствие индукции, наступило перераспределение зарядов, *диэлектрическое* [1] *смещение*. Стеклянная пластинка действует так, как будто пластины конденсатора сдвинуты ближе; уменьшенное расстояние дает большую емкость.

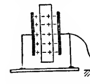


Рис. 266. Влияние диэлектрика.

Относительная диэлектрическая постоянная ε показывает, во сколько раз увеличивается емкость при внесении диэлектрика между обкладками (по сравнению с пустотой).

[1] Приставка диа — насквозь.

Относительные диэлектрические постоянные ε

Вещество	ε	Вещество	ε
Стекло	5—7	Парафин	2,3
Фарфор	6	Вода	81
Эбонит	2,7	Воздух (0°, 760 *мм* рт. ст.) .	1,0006
Янтарь	2,8		

Формула *емкости плоского конденсатора* с диэлектриком:

$$C = \varepsilon \frac{S}{4\pi h} \text{ см.}$$

Поведение непроводников в электрическом поле представляется следующим образом: в проводнике электроны свободно перемещаются, они могут следовать в направлении линий поля (влияние). В непроводниках электроны тесно связаны с атомами молекул. Под действием электрического поля происходит лишь небольшое смещение зарядов. Электрические заряды внутри диэлектрика взаимно уравновешиваются, а на поверхности его дают некомпенсированные связанные заряды. Для однородного поля плоского конденсатора получается:

$$C = \varepsilon \frac{S}{4\pi h};$$

следовательно,

$$\varepsilon = 4\pi C \frac{h}{S} = 4\pi \frac{Q}{U} \frac{h}{S} = 4\pi \frac{Q}{S} \frac{h}{U};$$

$\frac{U}{h}$ есть напряженность поля E. Величину $\frac{4\pi Q}{S}$ обозначают буквой D и называют эту величину *индукцией* или диэлектрическим смещением:

$$D = \varepsilon E.$$

Закон Кулона получает следующее выражение для пространства, заполненного веществом:

$$F = \frac{1}{\varepsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ дин.}$$

Б. ПОСТОЯННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

а) Постоянные магниты

Естественный магнитный железняк (Fe_3O_4) обладает свойством притягивать железные опилки.

Искусственные магниты изготовляются из стали в виде стержней или подков. На концах линейных магнитов расположены места наибольшего притяжения, *полюсы*, в середине находится *нейтральная зона*, где не возникает никакого притяжения. Если сломать намагниченную вязальную спицу, то на месте излома образуются два противоположных полюса, хотя до излома это место было нейтральным.

Свободно подвешенная магнитная стрелка указывает приблизительно на север. Полюс, обращенный к северу, называют *северным*, противоположный — *южным*.

Противоположные полюсы притягиваются, одноименные полюсы отталкиваются.

Для магнитных полюсов применим *закон Кулона*:

$$F = k\frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Если величины магнитных полюсов m_1 и m_2 [1] выбраны таким образом, что полюсы на расстоянии 1 *см* отталкиваются с силой в 1 дину, то при $k = 1$ получаем $m_1 = m_2 = 1$.

Северный и южный полюсы одинаковых магнитов обладают равными магнитными силами взаимодействия; при соприкосновении они взаимно компенсируются (опыт с вязальными спицами). Вывод из опыта с вязальными спицами: можно допустить, что линейный магнит состоит из большого числа маленьких *элементарных магнитиков*.

[1]) Следует иметь в виду, что понятие «величины магнитных полюсов» является устаревшим условным представлением, мало применяемым в настоящее время. (*Прим. ред.*)

Магнитные силы проявляются только на концах магнита, так как противоположные силы элементарных магнитов внутри тела взаимно уравновешиваются.

Стальной стержень можно намагнитить, натерев его каким-либо полюсом постоянного магнита. При натирании расположение элементарных магнитов упорядочивается (они располагаются цепочками); это расположение сохраняется и после прекращения воздействия постоянным магнитом.

Рис. 267. Магнитное влияние.

б) Магнитная индукция (влияние).

Если приблизить к полюсу магнита стержень из мягкого железа, то этот железный стержень намагничивается и притягивает легкие железные предметы (рис. 267). В мягком железе, очевидно, находятся элементарные магниты, которые под воздействием полюса располагаются упорядоченно. При удалении магнитного полюса железные опилки падают, сообщенное намагничивание (магнитная индукция) исчезает. Мы представляем себе, что элементарные магнитики приходят снова в хаотическое состояние, и вследствие этого железо размагничивается.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА

Величина полюса может быть грубо измерена при помощи весов (рис. 268). На чашку весов кладут магнит и

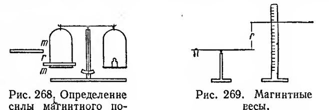


Рис. 268. Определение силы магнитного полюса.

Рис. 269. Магнитные весы.

его уравновешивают. Второй подобный же магнит, поднесенный на некоторое расстояние r, нарушает равновесие,

которое восстанавливается наложением или снятием дополнительного груза F. Тогда

$$F=\frac{m^2}{r^2}, \qquad m=r\sqrt{F}.$$

Для более точных измерений служат магнитные полюсные весы (рис. 269), намагниченное коромысло весов с перемещающимся рейтером (грузиком). При помощи калиброванного магнита можно прокалибровать любые магниты.

3. ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

а) Распределение линий поля

Полюсы магнитов создают в пространстве силовое действие: магнит возбуждает в окружающем его пространстве магнитное поле. Положение и направление линий поля можно определить при помощи маленького карманного компаса (рис. 270).

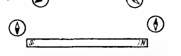


Рис. 270. Карманный компас указывает направление линий магнитного поля.

Проще всего получить картину магнитного поля при помощи картонного листа, расположенного над магнитами и равномерно посыпанного железными опилками. Легкими толчками можно ослабить трение между опилками и картоном; под действием магнита железные опилки становятся временными магнитиками и располагаются в направлении сил поля. Изображения магнитного поля при помощи опилок схожи с изображениями электрического поля, полученными при помощи кристалликов гипса, но отличаются только в одном: линии электрического поля начинаются на положительном заряде и кончаются на отрицательном, они не замкнутые.

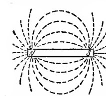


Рис. 271. Линии поля прямого постоянного магнита.

Линии магнитного поля замкнуты; они выходят из северного полюса и идут во внешнем пространстве к южному полюсу (рис. 271), а от южного полюса внутри магнита возвращаются в северный полюс.

Между одноименными полюсами проявляется «поперечное давление» линий поля (рис. 272).

Между разноименными полюсами двух одинаковых полосовых магнитов возникает *однородное магнитное поле*

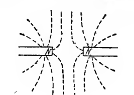


Рис. 272. Магнитное поле между двумя одноименными полюсами.

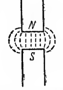


Рис. 273. Магнитное поле между двумя разноименными полюсами.

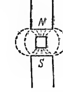


Рис. 274. Железо в однородном магнитном поле.

(аналог поля плоского конденсатора), только краевые линии поля не параллельны (рис. 273).

Если внести в это однородное поле кусок мягкого железа, то поле становится *неоднородным*. Линии поля собираются в железе (рис. 274). У нас возникает представление: железо обладает большей пропускной способностью (проницаемостью) для линий поля, чем воздух.

$$\text{Магнитная проницаемость } \mu = \frac{\text{число линий поля в среде}}{\text{число линий поля в воздухе}}.$$

Магнитная проницаемость μ показывает, во сколько раз сильнее воздуха влияет данная среда.

Рис. 275. Экранирующее действие железного кольца в однородном магнитном поле.

Для воздуха магнитная проницаемость $\mu_0 = 1$.

На большой магнитной проницаемости мягкого железа основано явление *магнитной экранировки* (рис. 275). Кольцо из мягкого железа, помещенное в однородное магнитное поле, втягивает в себя линии поля, и магнитные действия поля внутри кольца уничтожаются.

Если внести свободно подвешенный висмутовый стерженек в сильное однородное магнитное поле, то стерженек поворачи-

вается перпендикулярно к линиям поля. Висмут отклоняет от себя линии поля, через висмут проходит меньше линий, чем через соответствующее воздушное пространство.

По поведению в магнитном поле вещества делят на три группы:

1. *Ферромагнитные тела* (вещества): μ много больше 1; железо (до 30 000); кобальт, никель (до 500).

2. *Парамагнитные вещества*: μ немного больше единицы: платина, уран, эбонит.

3. *Диамагнитные вещества*: $\mu < 1$: висмут, каменная соль, медь, стекло, вода.

б) Напряженность (магнитного поля)

Напряженностью магнитного поля H (векторная величина!) называется сила, с которой единичный полюс в данной точке пространства отталкивается или притягивается.

Напряженность поля измеряется в эрстедах; эта единица названа в честь датского физика *Эрстеда* (1777—1851).

Поле, созданное в веществе, ориентирует его элементарные магниты: *магнитная индукция*.

Магнитная индукция выражается густотой линий индукции, она измеряется в гауссах (*гс*); получила название в честь математика *Гаусса* (1777—1855).

Напряженность поля и магнитная индукция имеют одно и то же значение для воздуха и вакуума, так как в этих случаях $\mu_0 = 1$.

Напряженность магнитного поля = силе, отнесенной к единичному полюсу; $H = \frac{F}{m}$.
Единица напряженности магнитного поля: 1 эрстед = = 1 дина на единичный полюс.
Магнитная индукция: $B = \mu H$ (гаусс).

В ферромагнитных веществах с увеличением напряженности магнитного поля растет также и магнитная индукция (и даже сильнее, чем напряженность поля) до некото-

рой точки насыщения. Дальнейшее увеличение напряженности уже почти не влияет. Уменьшение напряженности поля до нуля не уничтожает полностью индукции *(остаточный магнетизм)*. Кривая намагничивания состоит из двух ветвей (*петля гистерезиса*) (рис. 276).

Стрелки на ветвях кривой указывают путь намагничивания. Последнее происходит от нуля до некоторого наи-

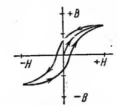


Рис. 276. Петля гистерезиса.

Рис. 277. Определение поля в двух главных положениях.

высшего значения. При уменьшении напряженности поля вследствие остаточного магнетизма намагничивание отстает от поля.

Напряженность поля прямого магнита легко вычислить для двух основных точек (рис. 277).

1. Главное положение в направлении оси (точка A)

$$x=\frac{m}{(R+l)^2};\quad y=\frac{m}{(R-l)^2};\quad H_A=y-x=\frac{4Rlm}{(R^2-l^2)^2}.$$

$2lm$ называется *магнитным моментом* M.

Для больших R и малых l: $H_A\approx\frac{2M}{R^3}$.

2. Главное положение на экваторе магнита (точка B).

По абсолютной величине $x=y$. Из подобия треугольников следует:

$$H_B:2l=y:R.$$

Так как $y=\frac{m}{R^2}$, то получается

$$H_B=\frac{2lm}{R^3}=\frac{M}{R^3}.$$

Напряженность поля на оси в два раза больше, чем на экваторе.

4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Магнитная стрелка, способная вращаться в горизонтальной плоскости, немного отклоняется от географического меридиана (линия север — юг); отклонение зависит от географической широты и изменяется со временем. Это отклонение называется *склонением*.

Склонение слегка изменяется в течение года. Угол склонения необходимо знать, чтобы иметь возможность внести соответствующие поправки в показания компаса.

Линии одинаковых склонений называются *изогонами*; знакомство с ними необходимо при использовании показаний магнитных компасов в авиации и мореходстве.

Если закрепить магнитную стрелку на горизонтальной оси таким образом, чтобы она могла вращаться в плоскости магнитного меридиана, то она образует угол с горизонтальной плоскостью; этот угол меняется в зависимости от широты местности и называется углом *наклонения*. Линии одинакового наклонения называются *изоклинами*. Земля представляет собой намагниченный шар с двумя полюсами. Магнитный *южный полюс* расположен вблизи географического северного полюса, около острова Мельвиля, на 71° северной широты и 96° западной долготы (*Росс*, 1831); *магнитный северный полюс* находится на 73° южной широты и 156° западной долготы (*Шеккельтон*, 1909) [1].

В. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

1. ИСТОЧНИКИ ТОКА

Если пластины плоского конденсатора соединить сырой шерстяной ниткой, то разрядка его произойдет не так быстро, как в случае соединения накоротко проводником; будет наблюдаться постепенное понижение напряжения. По шерстяной нитке текут электроны от отрицательной пластины к положительной, следовательно, течет электрический ток до тех пор, пока разность потенциалов между пластинами не станет равной нулю. В то время, когда еще

[1] Горизонтальная составляющая напряженности земного поля в Москве $H = 0{,}2$ эрстеда, вертикальная составляющая — около 0,5 эрстеда.

не знали сущности электричества, произвольно установили:

Электрический ток течет от положительного полюса к отрицательному полюсу.

Этим утверждением пользуются в технике, хотя теперь мы знаем, что в металле перемещаются только электроны и что следовало бы считать за направление тока направление от отрицательного полюса к положительному. Далее опыт показывает: причиной возникновения тока является напряжение между обеими пластинами. Таким образом «источники тока» представляют собой приспособления, которые поддерживают напряжение, т. е. они являются источниками напряжения.

Источниками тока служат: *гальванические элементы*, на полюсах которых напряжение поддерживается химическими превращениями; *аккумуляторы*, напряжение которых восстанавливается посредством химических реакций, происходящих при прохождении зарядного тока; при разрядке эти химические реакции происходят в обратном порядке. *В генераторах* для создания напряжения используется движение проводника в магнитном поле. Так как у нас отсутствует орган, воспринимающий электричество, мы можем судить об электрическом токе только по его действиям; вот пять основных:

1. *Нагревательное действие*. Нагревательные приборы, электрические лампы накаливания, тепловые измерительные приборы, предохранители.

2. *Химическое действие*. Разложение электролитов, серебрение, никелировка, хромирование, получение алюминия, восстановление чистых меди и железа.

3. *Магнитное действие*. Отклонение магнитной стрелки в приборах для измерения тока и напряжения, электромагниты, телеграфия, телефония.

4. *Силовое действие*. Отклонение проводника с током в магнитном поле, электрические двигатели.

5. *Световое действие*. Разряды в неоновых трубках, ртутные лампы, электрическая дуга.

Электрический ток представляет собой движение свободных электронов в металлах, кроме того, движение связанных с атомами электронов и положительных зарядов в жидкостях и газах.

2. ТОК, НАПРЯЖЕНИЕ, СОПРОТИВЛЕНИЕ

а) Основные единицы

Ток измеряется количеством электричества, протекающим через поперечное сечение проводника в секунду

$$I=\frac{Q}{t}.$$

За *единицу тока* принимается *ампер* (*а*); назван в честь французского физика *Ампера* (1775—1836).

$$1 \text{ ампер } (а) = \frac{1 \text{ кулон } (к)}{\text{секунда } (сек)},$$
$$1 \text{ миллиампер } (ма) = \frac{1}{1000} \text{ ампер } (а),$$
$$1 \text{ амперсекунда } (асек) = 1 \text{ кулон}.$$

Напряжение измеряется в вольтах (*в*) (ср. электростатическое определение, V.3).

$$1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ эрг}}{300 \text{ ед. заряда}} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}}.$$

Относительно практического получения единицы напряжения см. V. 5-г.

Проводники оказывают току сопротивление различной величины. *Сопротивление* зависит от вещества проводника (*удельное сопротивление* ρ — постоянная величина для данного вещества), от площади поперечного сечения s (для проволоки измеряется в $мм^2$) и от длины проводника l (измеряется в метрах); обратная величина удельного сопротивления $\frac{1}{\rho}$ называется удельной проводимостью.

За единицу сопротивления принимается *ом*; назван в честь немецкого физика *Ома* (1787—1854).

$$\text{Сопротивление } R = \rho \frac{l}{s} \text{ ом.}$$

Практически сопротивление в 1 *ом* равно сопротивлению ртутного столбика длиной 1,063 *м* и сечением 1 $мм^2$ при температуре 0° С.

Таблица удельных сопротивлений некоторых проводников

при 0° С $\left(в\ ом\ \frac{мм^2}{м}\right)$:

Серебро	0,016	хорошие проводники	Константан	0,49
Алюминий	0,032		Манганин	0,39
Медь	0,017		Никелин	0,42
Железо	0,09 ÷ 0,150			
Ртуть	0,958			

Удельное сопротивление металлов растет с температурой: $\rho = \rho_0 (1 + \beta t)$; для Al, Fe, Cu: $\beta = 0{,}005 \div 0{,}003$; для угля ($\beta = -0{,}003$) и проводящих жидкостей удельное сопротивление с повышением температуры уменьшается.

б) Закон Ома

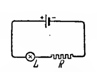
При установлении трех основных единиц было обращено внимание на то, что они все три связаны простым законом (в однородных, например металлических, цепях).

$$\textit{Закон Ома}: \quad \text{ток} = \frac{\text{напряжение}}{\text{сопротивление}}; \quad I(a) = \frac{U(в)}{R(ом)}.$$

Замкнутая электрическая цепь (рис. 278) состоит из источника тока (элемент, аккумулятор, генератор), проводов и потребителя L. Для ограничения тока служит сопротивление R; последнее потребляет часть напряжения и, поглощая некоторую мощность, нагревается.

Приборы, служащие для изменения сопротивления (реостаты):

1. Реохорд (металлическая струна).
2. Реостат со скользящим контактом (рис. 279).



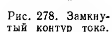


Рис. 278. Замкнутый контур тока.

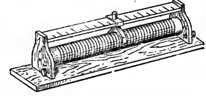


Рис. 279. Ползунковый реостат.

3. Рычажный реостат (рис. 280).
4. Штепсельный реостат (магазин сопротивлений) (рис. 281).

Закон Ома применим не только для отдельных участков цепи; он может быть сформулирован и для всей замкнутой цепи. На каждом участке цепи существует определенное

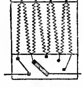


Рис. 280. Рычажный реостат.



Рис. 281. Штепсельный реостат.

падение напряжения, которое создает ток на данном участке; в каждом «потребителе тока» (приборе) создается особенно большое падение напряжения. Сумма падений напряжений дает общее напряжение, равное «электродвижущей силе» источника тока. Ток в любой точке неразветвленного проводника один и тот же, так как сколько электронов притекает к данной точке, столько и оттекает. Поэтому амперметр можно включать в любой точке неразветвленного контура; вольтметр же следует включать только между теми двумя точками, между которыми должно быть измерено напряжение.

3. РАЗВЕТВЛЕНИЕ ТОКА И ВКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

а) Законы Кирхгофа

К разветвленному току применимы следующие законы: Сумма отдельных токов равна полному току (рис. 282).

Рис. 282. Разветвление тока.

$$1.\ I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Токи в ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей.

$$2.\ I_1 : I_2 = R_2 : R_1 \quad \text{или} \quad I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}.$$

Пояснение. Так как ток до разветвления и после разветвления один и тот же, то он равен сумме токов в ответвлениях:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Второй закон является следствием из закона Ома. Напряжение U на концах ответвления является также напряжением для любой ветви.

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad \text{следовательно,} \quad I_1 : I_2 = R_2 : R_1.$$

б) Соединение сопротивлений

Из законов Кирхгофа следуют правила для соединения сопротивлений:

Последовательное соединение (рис. 283)

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Пояснение:

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3}; \quad U_1 + U_2 + U_3 = U;$$

$$U = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR.$$

Параллельное соединение (рис. 284):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

где R обозначает общее сопротивление разветвления.

Пояснение:

$$I_1=\frac{U}{R_1};\quad I_2=\frac{U}{R_2};\quad I_3=\frac{U}{R_3};\quad I=\frac{U}{R};\quad I=I_1+I_2+I_3.$$

$$\frac{U}{R}=\frac{U}{R_1}+\frac{U}{R_2}+\frac{U}{R_3};\quad \frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}.$$

Общее сопротивление меньше, чем любое из сопротив-

Рис. 283. Последовательное включение сопротивлений.

Рис. 284. Параллельное включение сопротивлений.

Рис. 285. Потенциометр (делитель напряжения).

лений ветвей, так как каждая новая ветвь дает увеличение сечения.

Частные случаи.

1. *Включение делителя напряжения* (рис. 285). Делитель напряжения применяется в тех случаях, когда для работы какого-либо прибора требуется только часть данного напряжения (например, от городской сети). Напряжение сети создает в сопротивлении ток определенной величины. Напряжение падает в сопротивлении на величину U; часть этого напряжения U_1 используется на ответвлении. Недостаток делителя напряжения состоит в том, что в основной цепи бесполезно расходуется мощность.

Рис. 286. Мостик Уитстона.

2. *Мостик Уитстона* (рис. 286). Мостик служит для сравнения сопротивлений. Два мало отличающихся сопротивления R и x образуют два плеча одной ветви; металлическая струна с подвижным контактом представляет вторую ветвь.

Ток I разветвляется на токи I_1 и I_2. Если чувствительный гальванометр показывает отсутствие тока в мостике, то это значит, что между точками *2* и *4* падение напряжения равно нулю, т. е. падение напряжения от *1* до *2* равно

падению напряжения от *1* до *4*.

$$U_1 = I_1 R; \quad U_2 = I_1 x;$$

$$U_1 = I_2 l_1; \quad U_2 = I_2 l_2;$$

отсюда

$$\frac{I_1 R}{I_2 l_1} = \frac{I_1 x}{I_2 l_2}; \qquad \frac{R}{l_1} = \frac{x}{l_2}.$$

Мостик Уитстона: $l_1 : l_2 = R : x.$

Струна (измерительная проволока) натянута на шкалу, так что можно сразу отсчитывать длины плеч. Наряду с этой простой конструкцией применяются новые приборы с переменными сопротивлениями и большим диапазоном измерений; при этом величина сопротивления отсчитывается по шкале без вычислений.

в) Соединение элементов

Последовательное соединение. Отрицательный полюс (—) первого элемента соединяют с положительным полюсом второго элемента (+) и т. д.

При последовательном соединении напряжения складываются

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Последовательное соединение n одинаковых элементов: каждый элемент обладает внутренним сопротивлением R_i, сопротивление внешней цепи R. При последовательном соединении общее внутреннее сопротивление nR_i,

$$I = \frac{nU}{nR_i + R} = \frac{U}{R_i + \frac{R}{n}}.$$

Последовательное соединение целесообразно применять при большом внешнем сопротивлении.

Параллельное соединение. Все положительные полюсы (+) присоединяются к одной шине, все отрицательные полюсы (—) — к другой. На концах шин возникает то же напряжение, что и на одном элементе

$$U = U_1 = U_2 = U_3.$$

Параллельное соединение (рис. 287) из n одинаковых элементов: при параллельном соединении уменьшается внутреннее сопротивление, так как параллельное соединение тождественно увеличению поперечного сечения:

$$I=\frac{U}{R+\frac{R_i}{n}}.$$

Рис. 287. Параллельное соединение элементов.

Параллельное соединение целесообразно при относительно большом внутреннем сопротивлении и малом внешнем сопротивлении.

Смешанное соединение. Элементы группируют таким образом, чтобы в соединении по возможности внешнее и внутреннее сопротивления были равны. Например, m параллельных групп элементов по n последовательно соединенных:

$$I=\frac{nU}{\frac{nR_i}{m}+R}=\frac{U}{\frac{R_i}{m}+\frac{R}{n}}.$$

Последовательное соединение элементов повышает напряжение. Параллельное соединение уменьшает внутреннее сопротивление.

г) Присоединение измерительных приборов

Электрические измерительные приборы основаны или на магнитных действиях тока (стрелочный гальванометр, приборы с вращающейся катушкой, железным сердечником) или на нагревательном действии тока (тепловые приборы). Их специальное назначение (как амперметра или вольтметра) зависит от способа включения и применения вспомогательных сопротивлений. Запомни:

> Амперметры включаются в основную цепь последовательно (рис. 288), вольтметры — в параллельное ответвление (рис. 289).

Стрелочный гальванометр—высокочувствительный прибор, поэтому он применим только при измерении токов в не-

сколько миллиампер. Внутреннее сопротивление прибора обозначим R_i. Чтобы иметь возможность использовать этот прибор для измерений, значительно больших токов, его шунтируют, т. е. параллельно ему включают некоторое

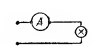


Рис. 288. Амперметр включают в главную цепь.

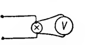


Рис. 289. Вольтметр подключают параллельно.

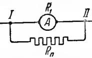


Рис. 290. Расширение пределов измерения амперметра.

сопротивление R_n (шунт). Это сопротивление изменяет, согласно законам Кирхгофа, предел измерения прибора. Если предел измерений амперметра должен увеличиться в n раз, то через прибор должна протекать $1/n$ часть основного тока (рис. 290):

$$I_n : I_1 = (n-1) : 1 = R_i : R_n; \quad R_n = \frac{R_i}{n-1}.$$

Пример. Сопротивление амперметра 50 *ом*, его предел измерения 50 *ма*, т. е. прибор может выдержать ток не более 50 *ма*. Чтобы увеличить предел измерения до 5 *а*, т. е. в 100 раз, следует параллельно амперметру включить сопротивление R_n:

$$R_n = \frac{50}{100-1} = \frac{50}{99} \approx 0{,}5 \text{ ом}.$$

Если соединить последовательно с измерительным прибором большое сопротивление R_v и включить эту комбинацию в ответвление (рис. 291), то через прибор потечет слабый ток $i = \frac{U}{R_v + R_i}$, при этом ток в основной цепи заметно не изменяется.

Рис. 291. Включение измерительного прибора в качестве вольтметра.

Прибор измеряет напряжение $U = i\,(R_i + R_v)$ и может быть проградуирован в вольтах; в этом случае он называется вольтметром. Падение напряжения распределяется на $R_v + R_i$. Это дополнительное сопротивление R_v обычно вмонтировано в прибор.

Для увеличения предела измерения вольтметра в n раз на прибор должна приходиться $1/n$ часть напряжения; тогда получается $R_v : R_i = (n-1) : 1$. Для увеличения предела измерения в 100 раз нужно включить дополнительное сопротивление, равное $99\ R_i$.

4. НАГРЕВАТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА, РАБОТА ТОКА

а) Нагревание, создаваемое током

При прохождении тока проводник нагревается. Мощность, выделяемая током, зависит от его величины и от сопротивления. Она может быть измерена при помощи калориметра (рис. 292).

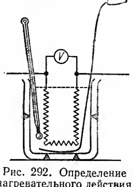


Рис. 292. Определение нагревательного действия тока.

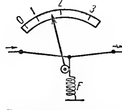


Рис. 293. Схема теплового измерительного прибора.

Расход мощности на нагревание пропорционален квадрату тока и сопротивлению проводника (*Джоуль*, 1843).

Работа нагревания $Q = CI^2Rt$ *кал* $= CIUt$ *кал.*

Электрический тепловой эквивалент $C = 0{,}239 \frac{кал}{джоуль}$, так как обычно измеряют напряжение в вольтах, а ток в амперах.

Вдвое больший ток за то же время создает четырехкратное нагревание проводника.

Удлинение проволоки от нагревания при прохождении тока может быть использовано для измерения тока: *тепловой измерительный прибор* (рис. 293). Обтекаемая током

тонкая проволока оттянута непроводящей нитью. Эта нить переброшена через блок со стрелкой. При прохождении тока проволока нагревается и удлиняется; пружина F оттягивает ее книзу, указатель перемещается вправо.

Так как нагревание, а также и удлинение растут пропорционально квадрату тока, то на тепловом приборе нанесена шкала, расстояния между делениями которой растут, как квадраты чисел. Тепловые приборы применяются как щитковые приборы для грубых измерений.

Преимущество: возможность применения для измерения переменного тока. Еще приборы, основанные на нагревательном действии тока: лампы накаливания, электрические печи, электрические плитки и электрические утюги, угольная дуга (дуговая лампа).

б) Мощность тока

Мощность обычно измеряется в ваттах $= \frac{\text{джоуль}}{\text{секунда}}$,

$$\text{Мощность } N = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

$$1\ \frac{\text{джоуль}}{\textit{сек}} = \frac{10^7 \text{ эргов}}{\textit{сек}} = 1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ ампер},$$

$$1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ ампер} = 1 \text{ ватт},$$
$$1\ \textit{квт} = 1000\ \textit{вт}.$$

$$1\ \textit{вт} = \frac{10^7\ \textit{эрг}}{\textit{сек}} = \frac{10^7\ \textit{дн} \cdot \textit{см}}{\textit{сек}} = \frac{1 \text{ ньютон} \cdot 100\ \textit{см}}{\textit{сек}} = \frac{1\ \textit{кпм}}{9{,}81\ \textit{сек}}$$

(ср. стр. 49)

$$1\ \textit{лс} = 75\ \frac{\textit{кпм}}{\textit{сек}} = 75 \cdot 9{,}81\ \textit{вт} = 736\ \textit{вт};\ 1\ \textit{квт} = 1{,}36\ \textit{лс}.$$

в) Работа тока

Работа в 1 киловатт-час получается, когда потребитель использует в течение 1 часа ток мощностью в 1 *квт* или в $1/n$ часа n *квт*.

$$\text{Работа} = \text{мощность} \times \text{время}.$$

Единица работы тока: 1 ватт-секунда = 1 ватт · 1 *сек.*
1 *втсек* = 1 джоулю
1 киловатт-час *(квтчас)* = 1000 *вт* · 3600 *сек* =
= 3 600 000 *втсек* (джоулей) = 367 200 *кпм.*

На основании закона Джоуля 1 *втсек* соответствует 0,239 *кал*,

1 *квтчас* = 0,239 · 3600 *ккал* = 860,4 *ккал.*

г) Термоэлектричество и эффект Пельтье

Непосредственное превращение тепла в электричество происходит в термоэлементах.

Основной опыт. Два различных металла (например, медь и висмут) спаяны с одного конца. Если подогреть место спая, то на свободных концах обнаруживается напряжение. Эти две металлические полоски образуют *термоэлемент.*

Особенно активными являются железо и висмут или медь и висмут. Возникшее напряжение очень мало, например висмут — медь дает 0,000093 *в* при разности температур в 1°; если сопротивление термоэлемента очень мало (например, 0,003 *ом*), то получается все же значительный ток: при разности температур в 100° С

$$I = \frac{0,0093}{0,003} = 3,1 a.$$

Рис. 294. Термоэлемент.

Последовательно соединенные термоэлементы образуют *термостолбик.* Термоэлементы применяются для измерения высоких температур в доменных печах. Напряжение измеряется в милливольтах (термоэлементы платина — платинородий дают на каждые 100° С около 0,001 *в*).

Для измерения переменных токов высокой частоты служит термокрест (рис. 294). Переменный ток нагревает место спая. На свободных концах креста возникает постоянная разность напряжений. Эти концы приключаются к миллиамперметру, в котором возникает постоянный ток.

Эффект Пельтье — обращение термоэффекта: если пропустить ток через место спая двух различных металлов, то оно охлаждается или нагревается в зависимости от направления тока; охлаждение наступает, когда ток течет в том же направлении, что и термоток, возникающий при нагревании спая.

5. ХИМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

а) Основные законы электролиза

Перенос электричества в жидкостях принципиально отличается от переноса электричества в металлических проводниках. В металлах перемещаются свободные электроны; в жидкостях перенос зарядов осуществляется заряженными атомами и молекулами; такие заряженные частицы называются ионами. Проводящая жидкость называется *электролитом*. В жидкость погружаются два электрода; электрод, соединенный с положительным полюсом источника тока, называется *анодом*; электрод, соединенный с отрицательным полюсом, — *катодом*.

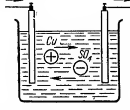


Рис. 295. Электролиз раствора медного купороса.

В водном растворе медного купороса (рис. 295) происходит расщепление (диссоциация) молекул $CuSO_4$. Атомы Cu заряжаются положительно, кислотный остаток SO_4 — отрицательно. Если приложить к электродам напряжение, то положительный ион Cu направится к катоду и отдаст ему свой заряд; отрицательный ион SO_4 — к аноду. Отдача заряда превращает ионы в нейтральные частицы и, следовательно, делает их способными к новым химическим соединениям. Кислотный остаток SO_4 захватывает у воды H_2 и образует H_2SO_4 (серную кислоту). Кислород выделяется на аноде. Cu осаждается на катоде в виде металлической меди. Перемещение ионов разных знаков в противоположных направлениях и создает электрический ток, текущий через электролит от анода к катоду. Источник тока, проводники и электролитический сосуд составляют замкнутую цепь (контур).

> Ионы водорода и металлов перемещаются в направлении движения положительного электричества и выделяются на катоде.

Водород и металлы называют поэтому катионами (в противоположность отрицательным ионам, которые направляются к аноду и называются анионами).

б) Техническое применение электролиза

1. *Получение химически чистых металлов*: электролитическая медь.

2. *Гальванотехника*: серебрение, никелировка, омеднение, хромирование. Предмет помещается в электролит в качестве катода. Ток должен быть рассчитан так, чтобы процесс осаждения не происходил слишком интенсивно и покрытие металлом происходило равномерно.

3. *Гальванопластика*. Воспроизведение предметов металлизированием гипсовых или восковых моделей. Восстановление клише, изготовление копий с печатных форм, изготовление бесшовных медных трубок.

4. *Получение чистых металлов*: алюминия из бокситов.

в) Законы Фарадея

Первый закон (1833). Выделившаяся при электролизе на электроде масса вещества пропорциональна току и времени. 1 *ампер* выделяет в 1 секунду:

0,0104 *мг* водорода,
0,3039 *мг* никеля,
0,339 *мг* цинка,
0,0829 *мг* кислорода,
0,0935 *мг* алюминия,
0,329 *мг* меди,
1,118 *мг* серебра

$$M = AIt.$$

A называется *электрохимическим эквивалентом*; он равен массе вещества (в *мг*), выделившейся из электролита при прохождении через него 1 *a* в течение 1 *сек*.

Вещество	A, мг	Атомный вес	Валентность	Химический эквивалент
Серебро	1,118	108	1	108
Медь	0,329	63,6	2	31,8
Водород	0,0104	1,008	1	1,008
Кислород	0,0829	16	2	8

Массы веществ, выделенные из различных электролитов при прохождении через электролит одинаковых количеств электричества, относятся между собой, как их химические эквиваленты.

$$\text{Химический эквивалент} = \frac{\text{атомный вес}}{\text{валентность}}.$$

Грамм-атомом вещества называется число граммов вещества, равное атомному весу. Атомные веса — сами относительные числа. При выделении одного грамм-атома n-валентного вещества через электролит протекает $n \cdot 96\,500$ кулонов электричества. При выделении 1 *г* водорода переносится поэтому 96 500 *к*. 1 *г* водорода содержит $6 \cdot 10^{23}$ атомов, отсюда следует, что заряд атома водорода

$$e = \frac{96\,500}{6 \cdot 10^{23}} = 1{,}60 \cdot 10^{-19} \text{ кулон}.$$

1 атом водорода переносит при электролизе 1 *элементарный заряд электричества.*

Выделенное при электролизе количество вещества может быть определено очень точно. Поэтому для измерения тока используют выделяющееся при электролизе количество вещества. Такого рода приборы называют *кулонометрами* и *вольтаметрами* (не следует путать с вольтметрами!). В кулонометре с гремучим газом измеряется количество выделившегося гремучего газа ($H_2 + O_2$), в медном кулонометре — количество выделившейся меди, в серебряном кулонометре — количество выделившегося серебра:

1 *а* выделяет в 1 *сек* 1,118 *мг* серебра.

Серебряный кулонометр состоит из платинового тигля (катод), который заполнен азотнокислым серебром (ляписом). В раствор опущен серебряный стержень, который служит анодом. Выделенное в тигле серебро взвешивается. Серебряный кулонометр используется при калибровках приборов.

г) Гальванические элементы

Между электродом, погруженным в электролит, и жидкостью устанавливается характерное для каждого вещества напряжение; оно возникает вследствие того, что ионы металла переходят в жидкость. Электрод приобретает при этом противоположный заряд: *электролитическое давление раствора*.

В *элементе Грене* (цинк и уголь в разбавленной серной кислоте) положительные ионы цинка переходят в раствор, цинковый стержень становится отрицательным; угольный стержень, которому при прохождении тока ионы цинка отдают свой заряд, становится положительным. Во внешней цепи течет устойчивый ток. Продолжающееся растворение цинка поддерживает напряжение; правда, вскоре оно падает, так как уголь вследствие вторичной реакции ($Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + 2H$) покрывается водородом, препятствующим дальнейшей отдаче заряда ионами (поляризация). Поляризация устраняется добавлением в электролит двухромовокислого калия, химически реагирующего с водородом.

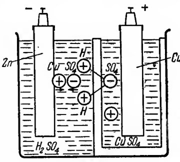


Рис. 296. Химические процессы в элементе Даниеля.

Элемент Даниэля (рис. 296). В пористом сосуде находится медный электрод, погруженный в раствор медного купороса; пористый сосуд в свою очередь погружен в раствор с разбавленной серной кислотой и окружен цинковым цилиндром [1]), который служит вторым электродом.

[1]) Рис. 296 несколько схематичен. *(Прим. ред.)*

Давление ионов меди в растворе меньше, чем ионов цинка. Проникновение ионов водорода в пористый сосуд, где они вытесняют из раствора ионы меди, образуя молекулы серной кислоты, приводит к осаждению меди на медном электроде. При этом он приобретает положительный потенциал относительно цинка. При замыкании элемента этот процесс продолжается и поляризации электродов не наступает. Напряжение элемента постоянно и равно 1,09 *в*.

В *элементе Лекланше* положительный полюс представляет собой угольный электрод, помещенный в оболочку, заполненную перекисью марганца (MnO_2). Электролитом служит раствор нашатыря, вторым полюсом — цинк. Перекись марганца химически связывает водород и устраняет поляризацию; напряжение элемента 1,5 *в*.

В сухих элементах раствор нашатыря смешан с особой пастой, вроде клейстера, помещенной внутри цинковой коробочки.

Особо устойчивое напряжение дает *нормальный кадмиевый элемент* (элемент Вестона), служащий международным эталоном напряжения (при 20° С 1,0183 *в*).

В технике имеют большее распространение вторичные элементы — аккумуляторы. В них химические превращения, происходящие при прохождении тока от постороннего источника (зарядке), при разрядке происходят в обратном порядке.

Свинцовый аккумулятор имеет отрицательные пластины, покрытые сернокислым свинцом (Pb_2SO_4), и положительные пластины, покрытые двуокисью свинца (PbO_2). Пластины погружены в водный раствор серной кислоты. При зарядке аккумулятора (пропускании тока от постороннего источника, причем (+) полюс аккумулятора приключается к (+) полюсу источника) к аноду аккумулятора подходят ионы SO_4, отдающие кислород и превращающие PbO_2 в Pb_2O_5; на катоде же выделяется водород, восстанавливающий Pb_2SO_4 в металлический свинец. При этом концентрация серной кислоты в растворе увеличивается. При использовании заряженного аккумулятора в качестве источника тока (разрядка) аккумулятор замыкается на потребителя. Ток в нем имеет направление, обратное току при зарядке, и химические реакции протекают в обратном порядке:

на аноде снова получается двуокись свинца, на катоде — сернокислый свинец. Концентрация серной кислоты в растворе при этом понижается.

Концентрация кислоты характеризует состояние аккумулятора; она контролируется ареометром.

Напряжение каждой банки равно 2 *в*, оно не зависит от величины пластин.

Железо-никелевый аккумулятор (щелочной); электролитом служит раствор едкого калия (21%), электродами — гидрат закиси никеля и железо. При зарядке анод превращается в гидрат окиси никеля, катод — в чистое железо. Напряжение равно 1,2 *в*.

$$\underset{\text{Анод}}{2Ni(OH)_3} + \underset{\text{Катод}}{Fe} \underset{\text{зарядка}}{\overset{\text{разрядка}}{\rightleftarrows}} \underset{\text{Анод}}{2Ni(OH)_2} + \underset{\text{Катод}}{Fe(OH)_2}$$

6. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

а) Основные опыты

Эрстед (1820). Обтекаемый током проводник отклоняет магнитную стрелку и стремится установить ее перпендикулярно к направлению тока (рис. 297 и 298). Направление отклонения определяется по *правилу Ампера*:

Если себя представить плывущим по направлению тока, лицом к магнитной стрелке, то левая рука укажет направление движения северного полюса.

Если проводник, обтекаемый током, свернуть в кольцо или катушку, то отклоняющая сила увеличится.

Рис. 297 и 298. Основной опыт Эрстеда.

Астатическая пара стрелок состоит из двух параллельных магнитных стрелок, которые крепко скреплены стержнем, проходящим через нейтральную зону. Стрелки повернуты друг к другу разноименными полюсами, и одна из них помещена в катушку с током.

Применения астатической пары стрелок исключает действие магнитного поля земли на прибор.

Ток, текущий в проводнике, создает вокруг себя в плоскости, перпендикулярной проводнику, магнитное поле.

Направление магнитных линий можно установить маленьким компасом, наглядную картину магнитного поля можно получить с помощью железных опилок (ср. Б. 3-а).

Направление поля определяется *правилом большого пальца*: если обхватить проводник правой рукой таким образом, чтобы вытянутый большой палец указал направление тока, тогда согнутые другие пальцы дадут направление

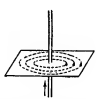


Рис. 299. Магнитное поле прямолинейного тока.

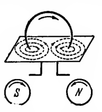


Рис. 300. Магнитное поле проволочного кольца.

силовых линий (рис. 299); они лежат в плоскости, перпендикулярной к проводнику.

Круговой проводник, обтекаемый током, действует, как магнит *(магнитный листок)* (рис. 300). Сторона, с которой глаз видит, что ток течет по часовой стрелке, является южным полюсом; сторона, с которой ток течет против часовой стрелки, является северным полюсом. Магнитное действие катушки, обтекаемой током, во много раз больше; свободно подвешенная, она устанавливается как магнит в направлении магнитного меридиана земли (установка Ампера).

Гальванометр с мягким железом (рис. 301). Катушка, обтекаемая током, втягивает в себя свободно подвешенный стержень из мягкого железа; сила притяжения увеличивается пропорционально квадрату тока.

Два железных стержня, помещенных рядом в катушку, когда включается ток, одинаково намагничиваются и отталкиваются друг от друга. Применяется это явление

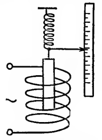


Рис. 301. Схема гальванометра с мягким железом.

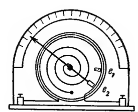


Рис. 302. Карманный гальванометр.

в *карманном гальванометре* (рис. 302): стержень e_1 закреплен, стержень e_2 связан с вращающейся стрелкой.

На основании представлений, данных в V. A. 3 относительно поперечного давления линий поля, которые применимы и к линиям магнитного поля, могут быть разъяснены следующие опыты.

1. *Два параллельных проводника, обтекаемых токами противоположных направлений, отталкиваются*, так как между токами магнитные линии оттесняют друг друга (рис. 303).

2. *Проводники с токами, текущими в одном направлении, притягиваются*, так как между токами поля (рис. 304) взаимно ослабляются.

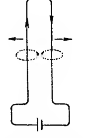


Рис. 303. Отталкивание параллельных токов противоположного иаправления.

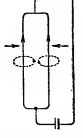


Рис. 304. Притяжение параллельных токов одинакового направлеиия.

Тот же принцип применим к обтекаемым током катушкам; их притягивание и отталкивание находят применение в динамометрах, служащих для измерения токов.

б) Закон Био и Савара

Еще *Лапласом* было установлено, что магнитное действие элемента тока уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Если линия r, соединяющая магнитный полюс m с элементом тока dl, образует угол α с направлением тока (рис. 305), то по закону Био и Савара

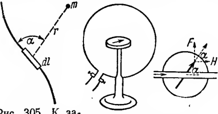


Рис. 305. К закону Био—Савара.

Рис. 306. Тангенс-буссоль.

$$dF = k\frac{mI\,dl}{r^2}\sin\alpha.$$

При этом сила dF направлена перпендикулярно к плоскости $(dl,\ r)$. Постоянная k зависит от выбора единиц. Если выбрать $k = 1$ и измерить F в динах, то отсюда получится новая мера для тока I. Эта единица носит название *электромагнитной единицы тока.*

$$1a = \frac{1}{10} \text{ единицы тока СГСМ.}$$

Отношение размерностей электростатической и электромагнитной единиц тока само имеет размерность скорости и численно равно скорости света $c = 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек.*

Система единиц

	Электромагнитная	Электростатическая	Практическая
Заряд	1 =	$3 \cdot 10^{10}$ =	10 кулонов
Ток	1 вебер =	$3 \cdot 10^{10}$ =	10 ампер
Напряжение	1 =	$\frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$ =	10^{-8} вольт

Применение. Тангенс-буссоль (рис. 306) для измерения тока. Если по круговому проводнику течет ток в $I\ (a) = \frac{I}{10}$ электромагнитных единиц, то отклоняющая сила по *закону Био и Савара*

$$F = 2\pi r \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{I}{10} = \frac{\pi I}{5r}.$$

Она действует перпендикулярно к плоскости круга, расположенного в плоскости магнитного меридиана. В направ-

лении магнитного меридиана действует горизонтальная составляющая H земного магнетизма. Обе силы дают равнодействующую, которая определяет направление магнитной стрелки.

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{F}{H}=\frac{\pi I}{5rH}; \quad I=\frac{5rH}{\pi}\operatorname{tg}\alpha=R\operatorname{tg}\alpha.$$

R называется постоянной тангенс-буссоли; ее легко найти экспериментально; для этого ток изменяют до тех пор, пока угол отклонения стрелки не достигнет 45°, тогда отсчитывают ток в амперах. Так как $\operatorname{tg} 45° = 1$, то $I = R$.

в) Практическая мера напряженности магнитного поля

Однородное поле внутри длинной катушки пропорционально числу витков и току и обратно пропорционально длине соленоида (катушки), но не зависит от сечения витков. Поэтому для практических измерений поля можно пользоваться произведением тока на число витков на 1 *см*, это выражение $\frac{Iw}{l}$ носит название *числа ампервитков* $\left[\frac{ав}{см}\right]$.

$$H=0{,}4\pi\frac{Iw}{l}=1{,}256\frac{Iw}{l};$$

следовательно,

$$1\,\frac{ав}{см}=1{,}256 \text{ эрстеда.}$$

г) Электромагниты

Если внести в соленоид, обтекаемый током, сердечник из мягкого железа, то магнитное поле усилится в несколько тысяч раз. Согласно *гипотезе Ампера* можно себе представить, что внутри мягкого железа текут молекулярные круговые токи, которые ориентируются внешним полем [1]. Магнитная проницаемость μ характеризует многократное усиление поля соленоида с сердечником по сравнению с полем незаполненного соленоида. Магнитная индукция B измеряется в гауссах.

Магнитная индукция $B=\mu H$.

[1] В действительности процессы в железе более сложны. (*Прим. перев.*)

Это усиленное действие используется в *электромагнитах*. С увеличением тока подъемная сила электромагнитов растет до некоторой предельной величины; это может быть объяснено тем, что все молекулярные токи вступили в действие.

Типы электромагнитов:

Катушка с железным сердечником и якорем, подковообразный магнит, электромагнит с замкнутой магнитной цепью (рис. 307).

Подъемная сила электромагнита:

Из полюса m выходят $4\pi m$ линий поля, между полюсом и якорем проходит поток BS линий. Полюс m испытывает

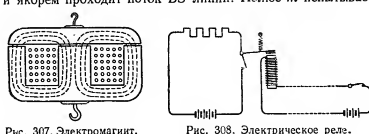


Рис. 307. Электромагнит. Рис. 308. Электрическое реле.

в поле B силу притяжения mB дин $= \frac{mB}{981\,000}$ *кп*, но $BS = 4\pi m$; следовательно, подъемная сила подковообразного магнита $F = \frac{B^2S}{4\pi \cdot 981\,000}$ *кп*, где S — площадь одного полюса. Для практического вычисления подъемной силы линейного электромагнита применяют формулу

$$F = \frac{0{,}04\, B^2S}{1\,000\,000}\, кп.$$

В этой формуле поперечное сечение S сердечника выражается в *см*^{2}, B — в гауссах и F — в *кп*.

Другие применения

Электрические реле состоят из катушки с железным сердечником; при замыкании тока якорь притягивается, при размыкании — отводится пружиной. Реле служат для автоматического замыкания и размыкания второй цепи (рис. 308).

Молоточек Гаммера размыкает и замыкает цепь электрического звонка (рис. 309), а также первичную цепь искрового индуктора. При замыкании рубильника ток идет через острие на молоточек и по обмотке электромагнита —

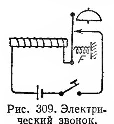


Рис. 309. Электрический звонок.

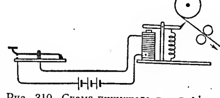


Рис. 310. Схема пишущего телеграфного аппарата Морзе.

обратно к противоположному полюсу. Железный сердечник из мягкого железа превращается в магнит и притягивает молоточек, размыкая цепь. Пружина оттягивает молоточек и снова замыкает цепь.

Телеграф Морзе. Якорь прижимает пишущее приспособление к движущейся при помощи часового механизма бумажной ленте и рисует точки и штрихи, в зависимости от продолжительности замыкания ключа Морзе (рис. 310).

В *головном телефоне* находятся две последовательно включенные катушки, которые надеты на полюсы постоянного магнита (рис. 311). Переменное магнитное поле переменного тока микрофона в катушках накладывается на поле постоянных магнитов и приводит в колебание мембрану (якорь!) (ср. V.Г.1).

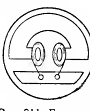


Рис. 311. Головной телефон.

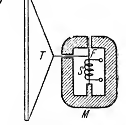


Рис. 312. Электромагнитный громкоговоритель.

Электромагнитный громкоговоритель (рис. 312). Изменяющееся под действием переменного тока звуковой

частоты намагничение пружины приводит ее в колебания между полюсами постоянных магнитов. Эти колебания передаются в воздух посредством диффузора громкоговорителя.

7. СИЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

а) Основные опыты

Подвижный обтекаемый током проводник, помещенный в магнитное поле, приходит в движение; направление этого движения перпендикулярно к плоскости, проходящей через проводник и магнитное поле (рис. 313). Магнитное поле, созданное током, накладывается на магнитное поле

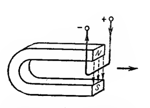


Рис. 313. Отклонение проводника с током в магнитном поле.

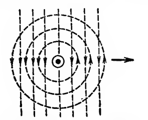


Рис. 314. Определение отклонения по распределению линий поля.

постоянного магнита. Сгущение линий поля увеличивает «поперечное давление», частичное уничтожение поля соответствует «пониженному давлению». Отсюда определяется направление движения (рис. 314).

В силовом поле, изображенном на рисунке, проводник расположен перпендикулярно к чертежу; ток идет из-за плоскости чертежа вперед (точка условно изображает начало вектора).

Правило левой руки. Если расположить три первых пальца левой руки взаимно-перпендикулярно и указательный палец направить по линии поля, средний в направлении тока, то большой палец укажет направление движения проводника.

Последовательность наименования пальцев: движение, поле, ток.

По закону Био и Савара ток I (a) в проводнике l действует на магнитный полюс m с силой $F = \frac{ml}{10r^2} I \sin \alpha$ *дн*. Если полюс m закреплен, а проводник подвижен, то закрепленный полюс оказывает на подвижный проводник такое же действие. В нашем случае $\alpha = 90°$, следовательно, $F = \frac{m}{r^2} l \frac{I}{10}$ *дн*. Напряженность поля H, а также магнитная индукция B в воздухе равняется $\frac{m}{r^2}$, следовательно, $F = \frac{BIl}{10}$ *дн*.

б) Применение в электродвигателе (см. Г. 2-а)

Вращающий момент, испытываемый отрезком проводника (длина l) с током I (a) на расстоянии r от оси вращения в поле с индукцией B, равняется $\frac{BIlr}{10}$ *дн · см*. При n отрезках получается:

вращающий момент

$$M = InlrB \cdot \frac{1}{10} \text{ дн} \cdot \text{см}.$$

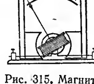


Рис. 315. Магнитоэлектрический прибор (с вращающейся катушкой).

Прибор с вращающейся катушкой (рис. 315) для измерения токов и напряжений. В поле постоянного магнита катушка, обтекаемая током, приходит во вращение, вследствие чего натягивается спиральная пружина. Угол поворота стрелки пропорционален току (линейная шкала).

8. ТОКИ В ГАЗАХ И ВАКУУМЕ

а) Разряд в воздухе при нормальном давлении

При нормальных условиях воздух является непроводником. Под действием тепла или ультрафиолетового излучения он становится проводящим. Носителями электриче-

ства являются газовые ионы. Если последние подводятся извне или возникают в газе, например при подводе раскаленных газов или при облучении, то такой разряд называется *несамостоятельным*. При высоком напряжении между электродами (искровой индуктор, электрофорная машина) происходит разряд без подвода ионов извне, сначала происходит тихий разряд (свечение), который с повышением напряжения переходит, вследствие усиления ионизации толчком, в прерывистый разряд (искровой разряд) и, наконец, в непрерывный разряд (дуговой разряд, дуговое свечение) — *самостоятельный разряд*.

Свойство ультрафиолетового излучения вырывать из цинка и других металлов электроны, которые впоследствии становятся причиной разряда, называется фотоэлектрическим эффектом (*Гальвакс*, 1888) [1].

Широкое применение *фотоэлектрический эффект* получил в фотоэлементе, в котором происходит превращение световой энергии в электрическую. Откачанный или заполненный инертным газом стеклянный сосуд покрыт изнутри слоем щелочного металла, являющимся катодом; в сосуд впаян добавочный электрод — анод. Фотоэлемент обычно находится под внешним напряжением; он служит управляющим органом. Поток электронов, освобожденный под действием света, пропорционален интенсивности света. Фотоэлемент работает безынерционно, он применяется в звуковом кино и телевидении.

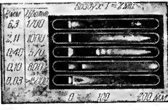


Рис. 316. Разряд в разреженных газах.

б) Разряд в разреженных газах

Если понижать давление газа, в котором находятся ионы или электроны, то возникают явления разряда, которые изменяются в зависимости от давления газа (гейслеровские трубки, рис. 316).

---

[1]) Фотоэффект открыт Герцем (1887). (*Прим. ред.*)

Давление, *мм* рт. ст.	Напряжение, *в*	Явление (см. рис. 316)
40	3 000	узкий голубой пучок искр
6	1 700	красноватый свет, у катода фарадеево темное пространство
2	1 000	увеличение темного пространства, свечение у катода
0,4	600	слои красноватого свечения
0,1	800	никаких слоев; голубоватое свечение, оторванное от катода; гитторфское темное пространство
0,03	15 000	в трубке нет свечения, стекло против катода флуоресцирует

в) Катодные лучи и каналовые лучи

В сильно эвакуированных трубках, находящихся под высоким напряжением, от катода исходит излучение, которое заставляет противоположную стенку трубки флуоресцировать. Тень свинцового экрана, установленного на пути лучей, показывает, что пучок распространяется прямолинейно (рис. 317). Флуоресценция вызывается электронами, которые освобождаются из катода.

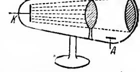


Рис. 317. Катодные лучи.

Катодные лучи (рис. 317). Катодные лучи могут быть отклонены магнитным и электростатическим полями (рис. 318).

Рис. 318. Отклонение катодных лучей электрическим полем.

Опыты с отклонением дают возможность определить отношение заряда катодной частицы к массе (e/m):

$$\boxed{\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^8 \ \frac{\text{кулон}}{\text{грамм}}.}$$

Катодные частицы — электроны несут заряд, равный

$$1{,}76 \cdot 10^8 \ к/г = 1830 \cdot 96\,500 \ к/г = 96\,500 \ к : \frac{1}{1830} \ г.$$

Масса электрона равна приблизительно $\frac{1}{1830}$ массы атома водорода[1]).

Катодные лучи возбуждают флуоресценцию многих веществ, они оказывают механическое действие (крыльчатка в катодной трубке). Скорость электронов в катодном луче зависит от напряжения и с увеличением напряжения возрастает (приблизительно до скорости света):

при	1 000 *в*	19 000 *км/сек*
при	10 000	58 000
при	100 000	165 000

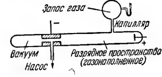


Рис. 319. Получение каналовых лучей.

Гольдштейн в 1886 г. использовал в качестве катода диск с отверстиями; при этом он открыл излучение, которое можно наблюдать с обратной стороны катода: каналовые лучи. Они также могут отклоняться полем и в основном заряжены положительно; их масса меняется в зависимости от газа, заполняющего трубку (рис. 319).

Каналовые лучи состоят главным образом из положительных ионов с различными зарядами.

Опыты *Томсона* и *Астона* (1919 г.) привели к открытию изотопов (масс-спектроскопия).

Изотопы — химически подобные элементы с различными атомными весами. Нецелочисленные атомные веса представляют собой средние значения атомных весов изотопов с различными целочисленными атомными весами.

г) Разряд в электронных трубках с высоким вакуумом

Высокий вакуум сам по себе идеальный изолятор. Но тем не менее в высоком вакууме можно создать несамостоятельный разряд:

[1]) Более точное значение указано в VI.3-б. (*Прим. перев.*)

1. Путем облучения катода ультрафиолетом: *фотоэлектрический эффект*.

2. Путем подогрева катода: *термоэлектронная эмиссия*.

Исследование излучения в *броуновской трубке* привело к заключению, что носителями зарядов являются электроны. Под действием электрических и магнитных полей электронные пучки в брауновской трубке отклоняются почти безынерционно (рис. 320). Отклонение катодных лучей полями можно поэтому использовать для изучения переменного напряжения или переменного тока (катодный осциллограф). В большинстве случаев в брауновской трубке на дно колбы наносится слой, который под действием катодных лучей дает флуоресцирующее зеленоватое пятно. Характер изменений переменных полей изучается при помощи вращающегося зеркала или особого отклоняющего приспособления, которое дает изображение на экране.

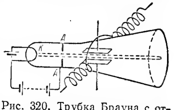


Рис. 320. Трубка Брауна с отклоняющими пластинами и магнитной катушкой.

Простейшей формой электронной лампы является *двухэлектродная лампа*; катодом является накаливаемая нить из вольфрама (рис. 321), она окружена анодом, отделенным вакуумом. Если к электродам приложено постоянное напряжение, то в лампе создается поток электронов, *анодный ток*.

Если к электродам приложено переменное напряжение, то электронный ток течет только в то время, когда анод положителен. Лампа пропускает *ток только одного направления*.

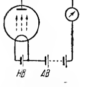


Рис. 321. Возникновение анодного тока.

Техническое применение: выпрямитель с накаленным катодом. Если переменное напряжение приложено к аноду, то анодный ток во время отрицательной полуволны заперт и течет только во время положительной полуволны.

При помощи выпрямителя с двумя анодами (рис. 322) удается использовать для прохождения анодного тока обе полуволны. Переменное напряжение, питающее первичную

катушку, трансформируется (ср. стр. 243). Часть вторичной обмотки дает ток накала на нагреваемый катод. В средней точке M сделан дополнительный отвод от вторичной катушки. Если переменный ток течет в ней налево, то анод A_1 имеет

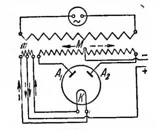


Рис. 322. Включение выпрямителя с горячим катодом.

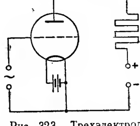


Рис. 323. Трехэлектродная лампа.

положительный потенциал. Электроны текут от K к A_1. Ток течет от A_1 через K к средней точке обмотки накала m и затем к положительному полюсу потребителя.

Когда переменный ток меняет знак, то он течет через A_2 к m к тому же положительному полюсу потребителя.

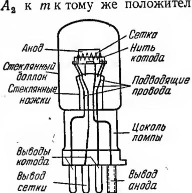
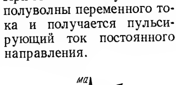


Рис. 324. Устройство лампы с накаливаемым катодом и сеткой.


При этом используются обе полуволны переменного тока и получается пульсирующий ток постоянного направления.

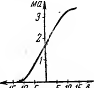


Рис. 325. Характеристика трехэлектродной лампы.

В *триоде* третьим электродом является сетка, помещенная между анодом и катодом. Если на сетку подано переменное напряжение (рис. 323), а на анод и катод — постоян-

ное напряжение, то анодный ток ослабляется, когда сетка отрицательна, и усиливается, когда она положительна. С помощью сетки можно ритмично управлять током в соответствии с колебаниями напряжения на сетке. Рис. 324 показывает устройство триода. В радиотехнике существуют лампы с восемью электродами.

Режим работы электронной лампы определяется *характеристиками* — кривыми, дающими связь между сеточным напряжением и анодным током при различных значениях анодного напряжения. На рис. 325 изображена одна из таких характеристик.

Г. ПЕРЕМЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

а) Основные опыты

Явление электромагнитной индукции до известной степени обратно силовому взаимодействию токов.

Если двигать проводник в магнитном поле, то на концах проводника возникает напряжение (рис. 326). При перемене направления движения изменяется знак наведенной разности потенциалов.

При движении прямолинейного участка замкнутого проводящего контура происходит уплотнение линий поля на передней стороне проводника и ослабление — на задней стороне. Это изменение распределения поля является результатом наложения на первоначальное магнитное поле магнитного поля индуцированного тока. В случае, изображенном на рис. 327, добавочное поле направлено по часовой стрелке, ток направлен за чертеж (это условно отмечено крестиком, символизирующим оперенный конец стрелки, направленной по току).

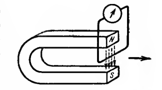


Рис. 326. Подвижный проводник в магнитном поле.

Закон Ленца. Направление индукционного тока таково, что поле перед проводником усиливается. Индукционный ток

всегда направлен так, что стремится затормозить движение, вызывающее возникновение этого тока.

Правило трех пальцев правой руки. Если расположить три первых пальца правой руки в трех взаимно-перпендикулярных направлениях, причем большой палец направить по движению проводника, указательный — по полю, то средний палец покажет направление индуцированного тока.

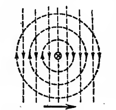


Рис. 327. К объяснению индуцированного напряжения.

Вместо того, чтобы двигать проводник, можно изменять магнитное поле, например включая и выключая электромагнит. При этом безразлично, пересекает ли проводник неподвижные линии поля, или происходит движение поля относительно неподвижного проводника. Для возникновения индукционного тока необходимо лишь изменение потока магнитной индукции через плоскость контура тока.

При использовании правила правой руки всегда следует считать движущимся проводник.

Всякое изменение магнитного поля порождает индукционный процесс.

Доказательство при помощи двух катушек, вставленных одна в другую (рис. 328).

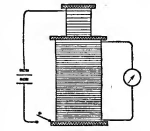


Рис. 328. Индукционные опыты.

Поднимание первичной (внутренней) катушки или размыкание тока в ней вызывает индукционный толчок. Опускание катушки или замыкание тока порождает толчки противоположного знака. Железный сердечник усиливает эффект в сотни раз. При возникновении или исчезновении магнитного поля, пронизывающего катушку, содержащую w витков, на концах катушки появляется напряжение в w раз большее, чем в одном витке.

б) Закон индукции

При движении проводника перпендикулярно к линиям магнитного поля возникает импульс напряжения $U\Delta t$. Чем больше этот импульс, тем соответственно больше получается и порождаемый напряжением импульс тока:

$$I\Delta t = \frac{U}{R}\Delta t; \quad \text{поэтому} \quad U\Delta t = IR\Delta t.$$

Импульс напряжения пропорционален площади S, описываемой проводником, движущимся перпендикулярно к линиям поля, индукции поля B и числу движущихся проводников:

$$U\Delta t = kBSw.$$

Если измерять B в гауссах, S — в *см*², Δt — в секундах, то для получения напряжения в вольтах нужно принять $k = 10^{-8}$. Таким образом,

$$U\Delta t = BSw \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \cdot \text{сек.}$$

Величина $BS = \Phi$ называется магнитным потоком (потоком магнитной индукции) и измеряется в вольт-секундах или в максвеллах:

$$1 \text{ вольт-секунда} = 10^8 \text{ гаусс} \cdot \text{см}^2 = 10^8 \text{ максвелл.}$$

Магнитный поток равен $\Phi = BS$ или Blh (h — длина пути, пройденного проводником длины l).

Если магнитный поток меняется во времени, то возникает напряжение

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Отрицательный знак соответствует закону Ленца. В однородном поле индуцированное напряжение определяется плотностью магнитного потока, длиной проводника и скоростью движения последнего.

U = плотности магнитного потока × длину проводника × скорость:

$$U = Blv \cdot 10^{-8}\ в.$$

в) Применения электромагнитной индукции

1. *Индукционная катушка.* Первичный контур тока (немного витков, толстая проволока) быстро замыкается и размыкается при помощи молоточкового или электролитического прерывателя. Быстро появляющееся и исчезающее первичное магнитное поле индуцирует во вторичной обмотке (большое число витков, тонкая проволока) S высокое напряжение. Так как изменяющийся магнитный поток пронизывает и первичную катушку, то и в ней возникает индуктированное напряжение, замедляющее нарастание тока при замыкании и поддерживающее ток



Рис. 329. Индукционная катушка.

Рис. 330. Микрофон и телефон.

при размыкании. При подключении конденсатора параллельно прерывателю ток при размыкании ослабляется. Конденсатор разряжается при следующем замыкании. При этом катушка дает ток только в одном направлении (от острия к диску, рис. 329).

2. *Микрофон* и *телефон* (рис. 330). В цепи микрофона под действием звуковых колебаний возникают изменения тока (благодаря изменениям сопротивления угольного порошка, имеющегося в микрофоне). Эти изменения вызывают переменное напряжение во вторичной катушке; по телефонной линии оно поступает к головному телефону. Здесь магнитное поле токов, меняющихся со звуковой частотой, налагается на магнитное поле постоянного магнита, усиливая или ослабляя последнее. Меняющееся магнитное поле

приводит в вынужденные колебания мембрану телефона (см. V. 6).

3. *Электродинамический громкоговоритель*. В кольцеобразной щели между полюсами электромагнита (или постоянного магнита) существует радиальное магнитное поле. В этом поле расположена легкая катушка, жестко связанная с диффузором громкоговорителя. При прохождении по катушке тока звуковой частоты происходит взаимное наложение магнитных полей. Катушка то втягивается в щель, то выталкивается из нее. Диффузор приходит в движение и создает звуковые колебания в окружающем воздухе (рис. 331).

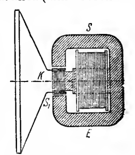


Рис. 331. Электродинамический громкоговоритель.

4. *Вихревые токи*. Если сплошной проводник вращается в магнитном поле, то в нем возникают индукционные токи, стремящиеся затормозить проводник (по закону Ленца). Эти индукционные токи называются вихревыми. Возникновение их во вращающихся частях электрических машин обычно нежелательно, так как благодаря создаваемому ими нагреванию они могут оказаться опасными для машины (потери энергии, повреждение изоляции при нагреве).

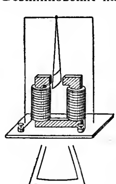


Рис. 332. Маятник Вальтенхофена.

Опыт с *маятником Вальтенхофена* (рис. 332). Маятник, сделанный из сплошной медной пластины, сильно тормозится электромагнитом. Маятник из пластины, имеющей форму гребенки, колеблется со значительно меньшим затуханием, так как в нем могут образоваться (из-за наличия воздушных зазоров) только слабые вихревые токи.

Технические применения: торможение при помощи вихревых токов, электрические счетчики. Изготовление железных сердечников для катушек и электромагнитов, применяемых в цепях переменного тока, из тонких пластин, покрытых для изоляции лаком.

г) Самоиндукция

При возрастании тока в катушке увеличивается и магнитный поток, пронизывающий катушку. При этом он индуцирует в ней напряжение, которое, по закону Ленца, препятствует нарастанию тока. Это явление называется *самоиндукцией*.

При замыкании контура тока, содержащего катушку с большим числом витков, образующийся магнитный поток индуцирует напряжение, заметно тормозящее нарастание тока. При размыкании контура тока исчезающий магнитный поток индуцирует напряжение, стремящееся поддержать первоначальный ток и заметно замедляющий его спадание (электромагнитная инерция). Это влияние самоиндукции особенно заметно в катушках, имеющих железные сердечники. Самоиндукция подавляется при бифилярной намотке катушек и устранении железных сердечников. При бифилярной намотке индукционные действия соседних участков проводов взаимно компенсируются.

Индуцированное напряжение $U = -L\frac{dI}{dt}$.

L называется *индуктивностью* катушки. Знак минус означает, что индуцированное напряжение противодействует изменениям тока.

Единицей индуктивности является генри. 1 генри (*гн*) соответствует индуктивности контура, в котором индуцируется напряжение в 1 вольт при изменении тока на 1 ампер в секунду.

Размерность индуктивности — длина (*см*).

1 генри = 10^9 *см*; 1 *мгн* = 0,001 *гн*.

Обоснование. В электромагнитной системе единиц единица тока составляет 10 ампер, единица напряжения — 10^{-8} вольт.

Из выражений

$$U\Delta t = w\Delta\Phi; \quad \Delta\Phi = \frac{4\pi\mu S w}{l}\Delta I$$

следует:

$$U\Delta t = 4\pi\mu \frac{w^2 S}{l} \Delta I = L\Delta I,$$

если положить

$$L = 4\pi\mu \frac{w^2 S}{l};$$

в электромагнитной системе μ является безразмерным числом, S измеряется в *см*², w — безразмерное число, l измеряется в *см*; поэтому размерность индуктивности есть *см*.

2. ГЕНЕРАТОРЫ И ДВИГАТЕЛИ

а) Основные опыты

Если виток проволоки вращается в магнитном поле (рис. 333), то в участках провода, пересекающих линии поля, индуцируется напряжение. Оно возрастает от нуля

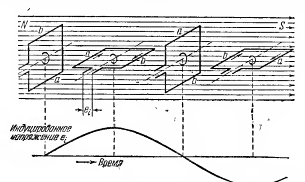


Рис. 333. Использование проволочного витка для возбуждения переменного тока.

(при перпендикулярном положении витка относительно линий поля) до максимума (при параллельном положении), и затем снова падает до нуля. При втором полуобороте знак напряжения меняется на обратный. Во внешней цепи, присоединенной к витку, течет *синусоидальный ток*. Подобное устройство действует, как источник напряжения —

генератор. Съем тока производится двумя скользящими контактами. Процесс этот обратим. Если пропускать переменный ток по такому витку, то он может вращаться с частотой изменений тока, так как при перемене направления тока направление вращения сохранится. Такое устройство действует, как *двигатель*.

Если снабдить виток двумя полукольцами, к которым прижимаются два скользящих неподвижных контакта (кол-

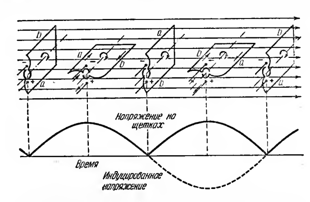


Рис. 334. Проволочный виток с коллектором; возбуждение тока постоянного направления.

лектор, рис. 334), то при первом полуобороте по-прежнему напряжение будет меняться от нуля до максимума и опять до нуля. При дальнейшем вращении скользящий контакт переходит на второе полукольцо; и напряжение между контактами будет изменяться, как и при полуобороте, — получается *пульсирующий ток постоянного направления*.

Напряжение генератора $U = wBlv10^{-8}$ *в*.

Здесь w — число витков, B — магнитная индукция, l — действующая длина проводника (сторона a или b), v — его скорость, равная $2\pi nr$.

Вращающий момент $M = IwlBr\frac{1}{10}$ *дн · см*.

б) Типы якоря и включения

Для усиления рассмотренных действий вместо одного витка используются якорные обмотки в виде катушек:

1. Якорь в форме двойного Т (рис. 335); обмотка размещается на сердечнике из мягкого железа; для уменьшения вихревых токов якорь набирается из тонких железных полос.

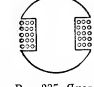


Рис. 335. Якорь в форме двойного Т.

2. Барабанный якорь с петлевой (рис. 336) или волновой обмоткой. На рис. 337 показано распределение напряжений при коллекторе, имеющем четыре сегмента.

Т-образный якорь имеет большой недостаток: при переходе скользящего контакта (щетки) с одной пластины коллектора на другую напряжение падает до нуля. В барабанных якорях этот недоста-

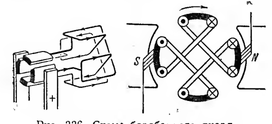


Рис. 336. Схема барабанного якоря.

ток устраняется, так как якорь имеет замкнутую на себя обмотку. При этом все витки вместе создают напряжение на щетках.

Рис. 337. Распределение напряжений при четырех сегментах.

Принцип самовозбуждения. Для создания магнитного поля вместо постоянных магнитов можно воспользоваться электромагнитом, так как в нем имеется остаточное намагничивание, создающее вначале слабый индукционный процесс. Если этот слабый ток пропустить через катушки электромагнита, то его намагничение постепенно возрастет до максимальной величины (динамоэлектрический принцип).

Типы генераторов

У последовательных генераторов (рис. 338) электромагниты и якорь включены последовательно. Напряжение генератора зависит от нагрузки, т. е. от создаваемого им тока. При росте тока поле усиливается и напряжение возрастает.

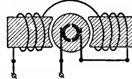


Рис. 338. Машина последовательного возбуждения.

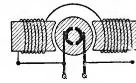


Рис. 339. Машина параллельного возбуждения.

В параллельных генераторах (рис. 339) напряжение более постоянно. Небольшое падение напряжения при росте нагрузки может быть скомпенсировано уменьшением сопротивления в цепи электромагнитов. Машины смешанного возбуждения (рис. 340) совмещают положительные свойства обоих первых типов. При росте нагрузки напряжение увеличивается за счет тока в главной цепи и уменьшается за счет ослабления тока в цепи индукторов.

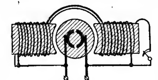


Рис. 340. Машина смешанного возбуждения.

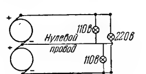


Рис. 341. Последовательное включение двух генераторов.

Генераторы, как и элементы, могут быть включены последовательно (рис. 341).

Работающий электродвигатель в то же время является и генератором, так как в нем индуцируется противодействующее напряжение U_i, а потому

| напряжение на его зажимах $U = IR_i + U_i$, |

где R_i — его внутреннее сопротивление.

При пуске двигателя нельзя подавать на него сразу пол
ное напряжение, так как при неподвижном якоре U_i отсутствует, и при малом сопротивлении якоря через него протек бы очень сильный начальный ток, что привело бы к перегреву обмотки и порче ее изоляции. Поэтому при пуске применяют реостат, который по мере увеличения скорости вращения и возрастания U_i постепенно выключается.

При использовании многополюсных машин можно получить большую мощность. При этом якорю придают *звездообразную* форму. В различных конструкциях неподвижная часть машины (статор) и вращающаяся часть (ротор) могут меняться ролями. Получаются *машины с внешними* (рис. 342)

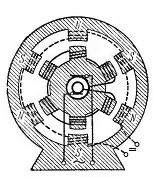
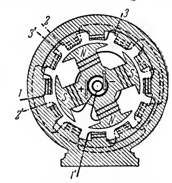


Рис. 342. Машнна с явно выраженнымн полюсамн.



Рнс. 343. Машнна с внутреннними полюсамн.

и *внутренними* (рис. 343) *полюсами*. Последние имеют то преимущество, что скользящий контакт используется только для подводки тока, возбуждающего магниты. При этом легче бороться с искрообразованием на контактах (рис. 342 и 343 относятся только к машинам переменного тока).

При симметричном расположении трех независимых обмоток *1*, *2*, *3* одна машина может быть использована для получения трех переменных напряжений, сдвинутых по фазе на 120°: *трехфазное напряжение*. Из рис. 344 можно уяснить, что сумма трех напряжений в любой момент времени равна нулю. Для отвода трехфазного тока в нагрузки достаточно трех проводов.

Три фазы обмотки генератора могут быть соединены в одной точке (соединение звездой, рис. 345). Так же можно соединить и нагрузки. Иногда общие точки нагрузок и

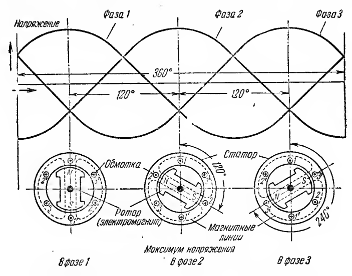


Рис. 344. Три фазы генератора трехфазного тока.

обмоток генератора соединяют нулевым проводом. Если нагрузки одинаковы, нулевой провод не несет тока. Между фазовым и нулевым проводом существует напряжение U,

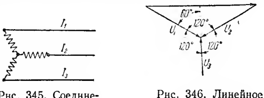


Рис. 345. Соединение звездой.

Рис. 346. Линейное напряжение.

называемое фазовым. Между двумя фазовыми проводами напряжение называется линейным $U_л$. Каждые два фазовых напряжения сдвинуты по фазе на 120°. Если фазовые напряжения изобразить векторами (рис. 346), то линейное

напряжение изобразится замыкающей равнобедренного треугольника с углом 120° при вершине. Поэтому получаем:

$$\frac{U_л}{2} : U = \sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad U_л = U\sqrt{3}.$$

Обычно фазовое напряжение используется для осветительных и бытовых целей (220 *в*), а линейное — для силовых установок (380 *в*).

Так как сумма трех фазовых напряжений в любой момент равна нулю, то фазовые провода можно замыкать и

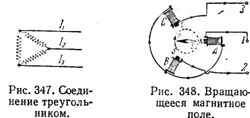


Рис. 347. Соединение треугольником.

Рис. 348. Вращающееся магнитное поле.

на треугольник (рис. 347). При этом можно пользоваться только фазовым напряжением U. Если в фазы *1*, *2*, *3* включить три симметрично расположенные катушки электромагнитов (рис. 348), то на пересечении их осей получается вращающееся магнитное поле, приводящее во вращение, например, компасную стрелку. Это явление используется в *асинхронных двигателях* с короткозамкнутым ротором.

в) Передача электрической энергии

Преимущество переменного тока перед постоянным заключается в возможности передавать его на большие расстояния с меньшими потерями. При этом применяют высокие напряжения и соответственно малые токи, что позволяет получить малые потери на нагревание даже в не слишком толстых проводах. Преобразование постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения представляет большие технические трудности, в то время как подобное преобразование переменного тока (неизменной частоты) осуществляется легко. Трансформаторы переменного тока не содержат вращающихся частей. В них исполь-

зуется индукционное действие первичной катушки, связанной со вторичной при помощи замкнутого железного сердечника. Замкнутый сердечник необходим для концентрации магнитного потока и направления его полностью в сечение вторичной катушки (рис. 349).

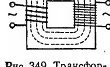


Рис. 349. Трансформатор с замкнутым железным сердечником.

Первичный и вторичный токи имеют одинаковую частоту, так как каждому максимальному изменению первичного тока отвечает максимальное индукционное действие. Прохождению первичного тока через нуль отвечает максимальное значение вторичного напряжения, так что они сдвинуты по фазе на 90°.

По закону индукции напряжения пропорциональны изменению магнитного потока и числу витков. Так как поток, пронизывающий обе катушки, одинаков, то напряжения относятся, как числа витков:

$$U_2 : U_1 = w_2 : w_1.$$

$$\textit{Коэффициент трансформации} = \frac{\text{число вторичных витков}}{\text{число первичных витков}},$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Коэффициент трансформации определяет соотношение получающихся напряжений.

В телефонной технике применяются трансформаторы с коэффициентом трансформации, близким к единице.

Понижающие трансформаторы (понижающие напряжение!) служат для получения в месте потребления электрической энергии нормальных напряжений.

Другие применения

Сварочные трансформаторы имеют вторичную обмотку, состоящую из малого числа витков (иногда из одного витка), что позволяет получить очень большие токи.

Звонковые трансформаторы служат для понижения напряжения от городской сети до значений, необходимых для работы электрического звонка.

Переменный ток превращается в постоянный при помощи *вращающихся преобразователей* или *выпрямителей*: для слабых токов применяются сухие выпрямители, для сильных — ртутные. Вращающийся преобразователь представляет собой электрическую машину, имеющую на общем валу двигатель и генератор. Если двигатель питается переменным током, то генератор дает постоянный ток (возможна также обратная комбинация). В одноякорных преобразователях обмотки обеих машин образуют общий якорь машины.

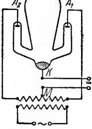


Рис. 350. Ртутный выпрямитель.

Ртутные выпрямители не имеют вращающихся частей (рис. 350). В разрядной колбе имеется катод из жидкой ртути и два металлических анода. Колба заполнена парами ртути. В течение одного полупериода электронный ток идет от катода к одному из анодов; в следующий полупериод — к другому аноду, так как разряд возникает лишь в том случае, когда жидкая ртуть является катодом. При этом из 50-периодного переменного тока получается ток постоянного направления, пульсирующий 100 раз в секунду (см. В. 8-г).

3. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

а) Общие свойства

Наиболее распространенным является синусоидальный переменный ток. Несинусоидальные переменные токи могут быть представлены суммой синусоидальных переменных токов.

Обозначим u — мгновенное значение напряжения, U — его максимальное значение, i — мгновенное значение тока, I — его максимальное значение. Угловая скорость вращения генератора, создающего переменное напряжение, равна

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

Величину ω называют *угловой частотой* напряжения (тока).

В цепях переменного тока максимум напряжения, вообще говоря, не совпадает во времени с максимумом тока, между напряжением и током образуется сдвиг фаз. Он вызывается влиянием индуктивностей и емкостей, включенных в цепь (ср. II. 1):

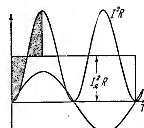


Рис. 351. Действующее значение переменного тока.

$$u = U\sin\omega t; \quad i = I\sin(\omega t \pm \varphi).$$

Применяемые в цепях переменного тока измерительные приборы показывают не мгновенные значения тока и напряжения, но их *действующие значения*. Под действующим значением понимают такой постоянный ток, который выделяет в некотором омическом сопротивлении ту же мощность, что и данный переменный:

$$U_д = \frac{U}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7U; \quad I_д = \frac{I}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7I.$$

Эти значения получают, рассматривая нагрев, создаваемый током; площади, отмеченные на рис. 351, одинаковы. Поэтому:

$$I_д^2RT = \frac{1}{2}I^2RT; \quad I_д = \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

б) Индуктивность и емкость в цепи переменного тока

Если в цепи переменного тока имеется *катушка*, то в ней индуцируется напряжение

$$u_L = -L\frac{di}{dt}.$$

Оно противодействует приложенному к цепи напряжению; его действие подобно действию некоторого сопротивления (*индуктивное сопротивление*), добавочно включенного в цепь, кроме реального омического сопротивления R:

$$iR = u - u_L; \quad u = iR + L\frac{di}{dt}.$$

Пусть $i = I \sin \omega t$, дифференцирование дает:

$$\frac{di}{dt} = \omega I \cos \omega t,$$

поэтому

$$u = IR \sin \omega t + I\omega L \cos \omega t.$$

Полагая

$$R = Z \cos \varphi, \quad \omega L = Z \sin \varphi$$

и учитывая, что

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1,$$

получаем:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}; \quad u = IZ \sin(\omega t + \varphi).$$

Полное сопротивление переменному току Z складывается из омического сопротивления R и индуктивного сопротивления ωL; последнее возрастает с частотой.

При индуктивной нагрузке напряжение опережает ток по фазе, ток отстает от напряжения.

Если включить *конденсатор* в цепь постоянного тока, то в цепи получается разрыв и протекание постоянного тока невозможно. В цепи переменного тока происходит попеременная зарядка и разрядка конденсатора, и переменный ток как бы проходит и между пластинами конденсатора.

Когда одна из пластин конденсатора заряжается отрицательно, другая вследствие индукции заряжается положительно, и наоборот. Конденсатор представляет некоторое сопротивление для переменного тока *(емкостное сопротивление)*: оно уменьшается при росте частоты.

При сообщении конденсатору заряда Q на нем возникает напряжение $u_C = \frac{Q}{C}$. При этом

$$Q = \int i \, dt = \int I \sin(\omega t) \, dt,$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i \, dt = -\frac{I}{\omega C} \cos \omega t.$$

$\frac{1}{\omega C}$ называют *емкостным сопротивлением.*

$$u = iR + u_C = IR \sin \omega t - \frac{1}{\omega C} \cos \omega t.$$

Полагая

$$R = Z \cos \varphi; \quad \frac{1}{\omega C} = Z \sin \varphi,$$

получаем:

$$u = IZ (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi) = IZ \sin (\omega t - \varphi);$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Конденсатор вызывает отставание по фазе напряжения на конденсаторе от зарядного тока, зарядный ток опережает напряжение.

Индуктивное и емкостное сопротивления влияют на фазовый сдвиг противоположным образом.

Если конденсатор и катушка включены в цепь переменного тока последовательно, то аналогичный расчет дает:

Полное сопротивление переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Из этой формулы видно, что влияние индуктивного сопротивления может быть уничтожено емкостным сопротивлением.

Условие резонанса:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Иногда величину Z называют *кажущимся сопротивлением.*

Величину $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ называют *реактивным сопротивлением*, так как катушка и конденсатор не потребляют мощ-

ности. Потери на нагревание возникают только в омическом сопротивлении, почему его и называют *активным сопротивлением*.

При сопоставлении трех сопротивлений, встречающихся в цепи переменного тока, следует помнить, что индуктивное и емкостное сопротивления создают фазовый сдвиг, что позволяет формально рассматривать их как векторы. Если активное сопротивление изобразить вектором, направленным в положительном направлении оси абсцисс, то индуктивное сопротивление (из-за фазового сдвига на $+90°$) должно быть представлено вектором, направленным в сторону положительных ординат (рис. 352), а емкостное сопротивление, создающее фазовый сдвиг $-90°$, следует изобразить вектором, направленным в сторону отрицательных ординат.

Рис. 352. Сдвиг фаз в цепи переменного тока.

Реактивное сопротивление $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ следует векторно сложить с активным сопротивлением (сумма равна диагонали прямоугольника). Для фазового сдвига находим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

в) Мощность в цепи переменного тока

Если разность фаз лежит между $\varphi = 0$ и $\varphi = 90°$, то мощность определяется только составляющей напряжения, совпадающей с током по фазе. Эту составляющую называют активной $U_а$, а составляющую, сдвинутую по фазе на 90°, — реактивной $U_р$. На рис. 353 изображены эти компоненты и для пояснения приводится механическая аналогия.

Мощность переменного тока при фазовом сдвиге φ равна

$$N = U_д I_д \cos \varphi \ \text{вт};$$

$\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности.

Частные случаи: $\varphi = 0$, ток и напряжение совпадают по фазе:

$$N = U_д I_д.$$

При наибольшей возможной разности фаз $\varphi = 90^\circ$

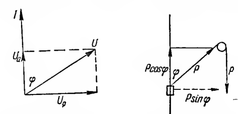


Рис. 353. Активное и реактивное напряжения.

получается $N = 0$. При трехфазном токе полная мощность складывается из трех фазовых мощностей:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 + U_2 I_2 \cos\varphi_2 + U_3 I_3 \cos\varphi_3.$$

При симметричной нагрузке фазовые мощности одинаковы, поэтому

$$N = 3 I_1 U_1 \cos\varphi_1.$$

Так как при соединении звездой линейное напряжение равно $U_л = U\sqrt{3}$, то фазовое $U = \frac{U_л}{\sqrt{3}}$. Тогда для полной мощности находим:

$$N = \sqrt{3}\, I U_л \cos\varphi.$$

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

а) Закрытый колебательный контур

Проводящий контур, содержащий катушку индуктивности L и конденсатор емкости C, называют замкнутым, или закрытым, колебательным контуром (рис. 354). Если первоначально зарядить конденсатор, то он будет затем разряжаться на катушку. При этом появится магнитное поле; за счет энергии последнего (по закону Ленца) конденсатор перезарядится. Это снова вызовет разрядный ток

через катушку, но обратного направления. Попеременный заряд конденсатора и его разряд на катушку будет продолжаться до тех пор, пока первоначальный запас электриче-

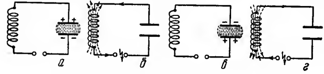


Рис. 354. Закрытый колебательный контур.

ской энергии не израсходуется на нагревание контура. Возникают затухающие электрические колебания. Период колебания зависит от величин индуктивности и емкости.

Формула Томсона для периода колебаний:

$$T=\frac{1}{f}=2\pi\sqrt{LC}.$$

Обоснование. Из выражения полного сопротивления переменному току

$$Z=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

следует условие резонанса:

$$\omega L-\frac{1}{\omega C}=0.$$

Отсюда получается:

$$LC=\frac{1}{\omega^2}=\frac{1}{(2\pi f)^2}; \quad T=\frac{1}{f}=2\pi\sqrt{LC};$$

f называют собственной частотой колебательного контура.

Для получения незатухающих колебаний необходимо возмещать от внешнего источника потери на затухание (сравни с маятником).

Для получения электрических колебаний сначала пользовались индукционной катушкой; к ее вторичной обмотке подключали конденсаторы (лейденские банки) и искровой промежуток. Возникающие при этом затухающие колебания обнаруживали, рассматривая искру в быстровращаю-

щемся зеркале (*Феддерсен*, 1858). Индикатором может служить также проволочное кольцо с небольшим числом витков, замкнутое на маленькую лампочку накаливания. Переменное магнитное поле индуцирует в катушке переменный ток, и лампочка загорается.

Действие закрытого контура удается наблюдать лишь на небольшом расстоянии, так как поля сосредоточены в катушке и конденсаторе и очень сильно убывают с расстоянием.

б) Открытый колебательный контур

Переход от закрытого контура к открытому иллюстрируется рис. 355. Закрытый контур превращается в электрический *диполь*. Этот переход был осуществлен Герцем в 1887—1889 гг. При этом Герц обнаружил распространение электро-

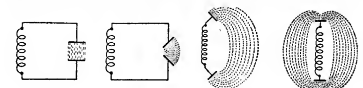


Рис. 355. Переход от закрытого колебательного контура к открытому.

магнитных волн в окружающем пространстве. В опытах Герца были получены волны длиной от 40 до 60 *см* и были проверены законы отражения и преломления, а также доказана поляризация электромагнитных волн.

При помощи рамки с натянутыми параллельными проволоками был произведен опыт, аналогичный оптическому опыту с анализатором из турмалиновой пластинки.

Распространение электромагнитных волн

При каждом искровом разряде и сопровождавшем его толчке тока в катушке создается переменное магнитное поле, лежащее в плоскости, перпендикулярной к оси диполя. Возникновение напряжения на концах диполя создает электрическое поле, расположенное перпендикулярно к магнитному. Эти связанные друг с другом поля, обра-

зующие единое переменное электромагнитное поле (рис. 356), распространяются в пространстве со скоростью света.

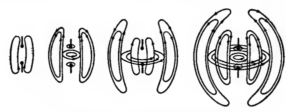


Рис. 356. Распространение электромагнитных волн.

Затухающие волны сильных искровых разрядов были использованы русским физиком *Поповым* (1859—1906) и позже итальянским инженером *Маркони* (1874—1937) для беспроволочной передачи телеграфных сигналов (радиотелеграфия).

в) Возбуждение колебаний при помощи электронной лампы

Для возбуждения незатухающих электрических колебаний применяется электронная лампа (рис. 357).

Анодный ток проходит по замкнутому колебательному контуру; катушка последнего индуктивно связана с имеющейся в цепи сетки катушкой обратной связи (*Мейсснер*, 1913). Катушка обратной связи передает колебания на сетку лампы, вследствие чего анодный ток усиливается в ритме с колебаниями контура. С замкнутым анодным контуром связана еще одна катушка, передающая колебания в антенну (диполь).

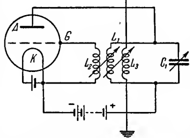


Рис. 357. Генератор с обратной связью.

В анодной цепи течет постоянный ток, пульсирующий в ритме колебательного контура. На катушку в цепи антенны влияние оказывают только изменения анодного тока. Поэтому в антенне возникают колебания.

Модуляция незатухающих колебаний. Колебания, создающие излучение антенны в пространство, являются высокочастотными, т. е. лежат далеко за пределами слышимости. При помощи телеграфного ключа можно посылать более или менее длинные волновые пакеты, излучаемые во все стороны в пространство; так осуществляется телеграфия (рис. 358).

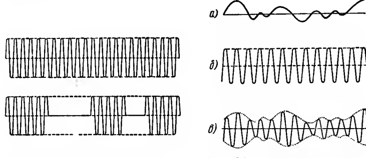


Рис. 358. Телеграфия незатухающими колебаниями.

Рис. 359. Модуляция незатухающих колебаний.

Включая цепь микрофона в цепь сетки или в антенну, удается осуществить наложение низкочастотных колебаний микрофонной цепи (*а* — звуковой частоты) на высокочастотные (*б* — несущие) колебания. Этот процесс называется модуляцией (*в*) (рис. 359). В приемнике нужно отделить колебания звуковой частоты от несущей частоты и сделать их слышимыми.

г) Прием модулированных волн

Вертикально натянутая проволока (прямолинейная антенна) представляет верхнюю половину диполя; его нижняя половина заменена хорошо проводящей землей. Электромагнитные волны, распространяющиеся над земной поверхностью, индуцируют в *антенне* переменное напряжение. Прямолинейная антенна реагирует на электрическое поле, направленное параллельно ей. Иначе ведет себя рамочная антенна. Здесь индукция создается магнитным полем, пронизывающим плоскость рамки. Рамочная антенна об-

ладает направленным действием: индуцированный переменный ток оказывается наибольшим, когда плоскость рамки совпадает с направлением на передатчик, так что магнитное поле оказывается перпендикулярным к плоскости рамки. В обоих случаях в антенне течет переменный ток. Если колебания достаточно сильны, то они непосредственно передаются в связанный контур, настроенный в резонанс, и здесь делаются слышимыми благодаря включению детектора и телефона (или громкоговорителя).

Детектором может служить кристалл, пропускающий ток только в одном направлении и потому служащий выпрямителем. Мембрана телефона слишком инертна, чтобы следовать за высокочастотными колебаниями, она успевает двигаться лишь в ритме наложенных колебаний низкой частоты, благодаря чему последние и выделяются из пришедшего сигнала (рис. 360).

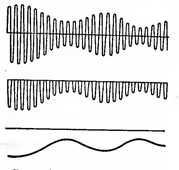


Рис. 360. Детектирование.

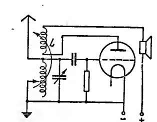


Рис. 361. Регенератор.

При приеме удаленных передатчиков применение детектора уже не дает положительных результатов. Вместо него применяют электронную лампу, например в схеме регенератора.

Схема регенератора (рис. 361) должна решать две задачи: *выделять* из приходящих колебаний *звуковую частоту* и *усиливать* последнюю. Летящие из катода электроны частично оседают на сетке, сообщая ей отрицательный потенциал относительно катода. Приходящие на сетку из антенны колебания по-разному влияют на потенциал сетки: положительная полуволна способствует дополнительному попаданию электронов на сетку, отрицательная — нет. Поэтому и

влияние обеих полуволн на анодный ток получается неодинаковым — осуществляется детектирование. Меняющийся анодный ток, проходя по анодной катушке L своим магнитным полем индуцирует на сетке добавочное напряжение, в результате чего колебания усиливаются. Включая последовательно несколько самостоятельных усилителей, можно настолько усилить колебания, что они приведут в действие громкоговоритель (*многокаскадное усиление*).

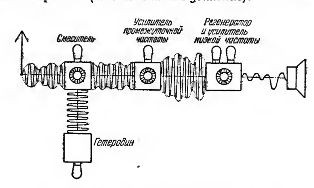


Рис. 362. Схема супергетеродинного приемника.

При *супергетеродинном приеме* (рис. 362) применяется вспомогательный источник колебаний высокой частоты — гетеродин. Принимаемые колебания накладываются на колебания гетеродина, в результате чего получаются колебания промежуточной частоты (равной разности обеих частот). Они в дальнейшем усиливаются и детектируются.

Распределение волн по диапазонам

Длинные волны	от 50 *кгц*	до 500 *кгц*;	от 6 *км*	до 600 *м*
Средние волны	500 *кгц*	5 *мгц*;	600 *м*	60 *м*
Короткие волны	5 *мгц*	30 *мгц*;	60 *м*	10 *м*
Ультракороткие волны . .	30 *мгц*	300 *мгц*;	10 *м*	1 *м*
Сверхкороткие волны . .	300 *мгц* и выше		1 *м* и меньше	

Длинные и средние волны распространяются главным образом вдоль земной поверхности; средние волны частично могут отражаться от верхних ионизированных слоев атмо-

сферы (*ионосфера* расположена между 100 и 400 *км* над уровнем земли); при интерференции прямой и отраженной волн возможно возникновение замираний приема.

Ультракороткие волны распространяются почти прямолинейно. Поэтому прием ультракоротких волн в основном возможен лишь в пределах прямой видимости. Короткие волны отражаются от ионосферы и, возвращаясь на землю на большом расстоянии от передатчика, обеспечивают радиосвязь между весьма удаленными пунктами.

VI. ИЗЛУЧЕНИЕ И ВЕЩЕСТВО

А. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

1. ШКАЛА ВОЛН

а) Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения

Видимый (воспринимаемый глазом) спектр составляет лишь небольшую часть полного спектра. Со стороны длинных волн он примыкает к *инфракрасному* спектру. Стекло поглощает инфракрасные лучи; поэтому для их исследования применяются линзы и призмы из каменной соли или полевого шпата. Исследованная часть инфракрасного спектра охватывает длины волн от 400 $\mu = 0{,}04$ *см* до границы видимого спектра, т. е. до $\sim 0{,}8\ \mu$; она содержит 9 октав, а видимый спектр охватывает только одну октаву.

Инфракрасное излучение при поглощении создает значительное нагревание. Оно измеряется приборами, электрическое сопротивление которых сильно меняется с температурой; изменение сопротивления и служит мерой энергии инфракрасных лучей. При этом удается обнаружить прирост температуры до 10^{-6} градусов. В инфракрасном спектре также наблюдаются и линии поглощения (фраунгоферовы линии). Инфракрасные лучи проходят сквозь туман и мглу (инфракрасная фотография).

По другую сторону видимого спектра в области более коротких волн обнаруживается *ультрафиолетовое* излучение. Для его изучения применяются линзы и призмы из кварца или специального увиолевого стекла. Чем выше температура источника, тем больше ультрафиолетовых лучей им излучается. Эти лучи обладают главным образом химическим действием, они вызывают почернение бромистого и иодистого серебра (на этом основана фотография). Ультрафиолетовые лучи вредно влияют на кожу (солнечные ожоги

на больших высотах). Нижние слои атмосферы почти полностью поглощают ультрафиолетовое излучение солнца. Ультрафиолетовые лучи создают ионизацию газа; их поглощение в верхних слоях атмосферы является одной из причин возникновения ионосферы.

Ультрафиолетовые лучи можно обнаружить при помощи платиносинеродистого бария или уранового стекла. Эти вещества обладают способностью поглощать коротковолновое излучение и испускать более длинноволновое (флуоресценция). Таким образом, часть ультрафиолетового излучения преобразуется в видимое. Ультрафиолетовое излучение охватывает около семи октав, простираясь до волн порядка $4 \cdot 10^{-7}$ *см*.

б) Рентгеновское излучение

Если катодные лучи, созданные в хорошо откачанной разрядной трубке, попадут на металлическую пластинку (антикатод), соединенную с анодом (рис. 363), то из антикатода исходит излучение, заставляющее стеклянные стенки трубки флуоресцировать зеленым цветом; само излучение не видимо. Эти лучи, открытые в 1895 г. *Рентгеном* (1845—1923), были названы его именем. Они оказывают действие на фотографическую пластинку и обладают большой проникающей способностью (просвечивание). Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, оно не отклоняется ни электрическим, ни магнитным полем. Атомные кристаллические решетки позволяют получить дифракцию рентгеновских лучей (*Лауэ*, 1912). Таким образом доказываются их волновые свойства.

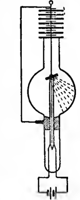


Рис. 363. Рентгеновская трубка.

Существует два рода излучения: первое имеет сплошной спектр, резко обрывающийся со стороны коротких волн (тормозное излучение). Граница спектра определяется напряжением, под которым работает трубка. Второе — характеристическое излучение, называемое также собственным, обладает линейчатым спектром. Оно является результатом процессов,

происходящих в атомах антикатода, и возникает только при достаточно высоких напряжениях. Положение лиий зависит от материала антикатода.

Закон Мозли. Английский физик *Мозли* (1888—1915), исследуя характеристическое излучение, установил следующий закон:

$$\nu = C(Z - a)^2.$$

Здесь ν — частота колебаний, C и a — постоянные величины, Z — номер элемента в периодической системе элементов Менделеева (атомный номер). Этот закон послужил доказательством того, что характеристикой, определяющей положение элемента в периодической системе, является не его атомный вес, но число зарядов атомного ядра (см. 3-б).

в) Радиоактивные излучения

В 1896 г. французский физик *Беккерель* обнаружил излучение, испускаемое соединениями урана. Оно ионизирует воздух, действует на фотографическую пластинку и создает яркие светящиеся вспышки на экране, покрытом платиносинеродистым барием. Подсчет вспышек в *спинтарископе* дает возможность оценить активность препарата.

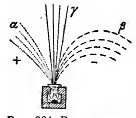


Рис. 364. Радиоактивные излучения.

Мария Кюри (1867—1934) получила в чистом виде элементы полоний и радий. В настоящее время известно до сорока естественных радиоактивных веществ. Исследование радиоактивных излучений в электрическом и магнитном полях показало, что существует три рода излучений (рис. 364).

α-лучи — дважды ионизированные атомы гелия, летящие со скоростью до 25 000 *км/сек.*

β-лучи — *электроны,* движущиеся со скоростью до 280 000 *км/сек.*

γ-лучи — неотклоняемое излучение, представляющее *электромагнитные волны,* распространяющиеся со скоростью 300 000 *км/сек.*

Длины волн γ-лучей лежат между 10^{-9} и 10^{-11} *см.*

г) Космическое излучение

В первом десятилетии XX века *Гессом* и *Кольхерстером* было начато исследование излучения, приходящего со всех сторон из мирового пространства (космическое излучение). Поглощаясь в верхних слоях атмосферы, оно порождает вторичные излучения, что сильно затрудняет его исследование. Космическое излучение обладает громадной проникающей способностью и прослеживается на дне глубоких озер. Свинцовый блок толщиной 1,5 *м* ослабляет наиболее проникающую часть излучения всего лишь наполовину.

В настоящее время принято считать, что первичное космическое излучение состоит из ионизированных атомов водорода, движущихся с громадными скоростями, еще недостижимыми для наших лабораторных установок. Исследование космических лучей дает весьма ценные сведения для изучения строения атомного ядра.

д) Шкала электромагнитных волн

Многие физические процессы являются волновыми. Русский физик *Лебедев* (1866—1912) для их графического представления воспользовался логарифмической шкалой, в которой единица длины шкалы соответствует одной

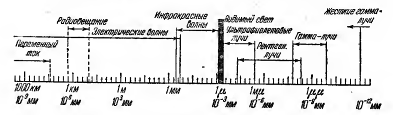


Рис. 365. Шкала электромагнитных волн.

октаве. Так, если за исходную волну принять волну длиной в 1 *мм*, то на 10 делений левее расположится волна длиной $2^{10} = 1024$ *мм* ≈ 1 *м*. На 10 делений правее исходной точки расположится волна, равная $1/1024$ *мм*, то есть порядка 1 микрона (рис. 365).

2. ЗАКОНЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

а) Закон излучения Кирхгофа

Всякое излучение уносит с собой энергию. Для поддержания излучения необходимо подводить соответствующее количество энергии к излучающему телу. Нагретые твердые тела излучают невидимое инфракрасное излучение. При 540° С начинается красное свечение, излучение охватывает часть видимого спектра, при 750° С возникает также желтое свечение, при 1200° С начинается белое свечение. В этом случае излучение охватывает уже весь видимый спектр.

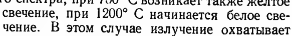
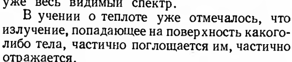



Рис. 366. Ход лучей в полом шаре.

В учении о теплоте уже отмечалось, что излучение, попадающее на поверхность какого-либо тела, частично поглощается им, частично отражается.

Тело, полностью поглощающее падающее на него излучение, называют *абсолютно черным телом*. Такое тело можно осуществить, взяв полый шар с зачерненными внутренними стенками и проделав в нем маленькое отверстие (рис. 366).

Кирхгоф (1824—1887) установил закон излучения. Если обозначить лучеиспускательную способность тела E, его поглощательную способность A, тогда

по закону Кирхгофа: $A = kE$,

то есть лучеиспускательная способность (при определенной длине волны и температуре) пропорциональна лучепоглощательной способности.

Для абсолютно черного тела $A = E$, $k = 1$.

б) Законы Вина и Стефана—Больцмана

Распределение энергии по спектру для абсолютно черного тела характеризуется *законом смещения* Вина

Закон Вина: $\lambda_{макс} = \frac{b}{T}$,

$b = 0{,}2898$ *см · град*

Длина волны, соответствующая *максимуму излучения*, обратно пропорциональна абсолютной температуре (рис. 367).

Зная положения максимума излучения какой-либо излучающей поверхности (если она может быть принята за

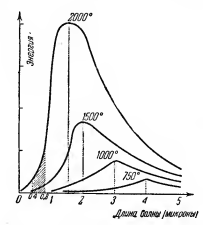


Рис. 367. Зависимость максимума излучения от абсолютной температуры.

абсолютно черную), можно оценить ее температуру. Так, для поверхности Солнца получается около 5600° С.

Оценка полной *энергии излучения* черного тела дается законом, найденным эмпирически *Стефаном* (1835—1893) и теоретически обоснованным *Больцманом* (1844—1906).

Закон Стефана—Больцмана:

$$E = cT^4; \quad c = 1{,}36 \cdot 10^{-12} \frac{кал}{см^2 \cdot град^4 \cdot сек}.$$

При росте температуры излучаемая энергия резко возрастает. Так, при 546° С излучение в 81 раз превосходит излучение при 0° С. В осветительной технике даже небольшое увеличение температуры раскаленной нити значительно увеличивает энергию ее излучения.

в) Формула Планка

Закономерный характер кривых излучения заставляет думать, что эти кривые отражают некоторый общий закон и что он может быть сформулирован математически. Эта формулировка была дана *Максом Планком* (1900) на основе совершенно нового исходного предположения, что излучение имеет атомную структуру и что полная энергия излучения всегда является целым, кратным энергии атома излучения (фотон, квант). Но энергии фотонов не одинаковы, они зависят от частоты колебаний:

Энергия фотона $\varepsilon = h\nu$; $h = 6{,}623 \cdot 10^{-27}$ *эрг · сек.*

Постоянная h называется *постоянной Планка*; ν — частота колебаний.

Большое значение идей Планка заключается во введении совершенно новых представлений, в установлении того факта, что излучение не является непрерывным процессом, но осуществляется отдельными актами; в процессе каждого акта излучается фотон, имеющий определенную энергию. Понятие энергии связано с понятием работы. В классической механике энергия мыслится непрерывной функцией состояния. Произвольно малому изменению силы или пути соответствует произвольно малое изменение работы и, следовательно, энергии. Квантовая теория отрицает непрерывность процессов излучения; согласно Планку излучение состоит из отдельных атомов (фотонов), обладающих дискретными значениями энергии. Лишь благодаря малости энергии фотонов и громадному числу их излучение представляется непрерывным процессом. Идеи Планка нашли блестящее подтверждение в атомной физике и привели к совершенно новым ценным результатам. Правильность их в настоящее время не вызывает никаких сомнений.

Фотоны отличаются от атомов и электронов, они бывают различны по своим энергетическим характеристикам. Так, энергия фотона, соответствующего фиолетовому свету, больше, чем энергия фотона, соответствующего красному цвету. При этом по-новому трактуется волновая природа света. В какой-то степени фотоны можно сопоставить со

световыми корпускулами Ньютона. Хотя на первый взгляд кажется, что идея корпускулярного строения не совместима с явлениями интерференции и дифракции, но в действительности это не так: *квантовая теория* способна объяснить эти явления.

Б. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

1. КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ

а) Основные идеи кинетической теории газов

Для объяснения законов, которым подчиняются покоящиеся и движущиеся жидкости и газы, достаточно рассматривать их молекулы как упругие шарики. Исходя из этой идеи, *Клаузиус* (1822—1883) и *Больцман* (1844—1906) построили кинетическую теорию газов.

По этой теории давление газа обусловлено ударами отдельных молекул о стенки сосуда. При росте температуры увеличивается скорость движения молекул и число их соударений друг с другом и со стенками сосуда. Закон Бойля—Мариотта, как выясняется, является статистическим законом.

б) Основной закон кинетической теории газов

Совершенно беспорядочное движение молекул можно описать суммой трех движений параллельно ребрам кубика со стороной a, мысленно выделенного в газе. Пусть скорость молекулы равна v, масса ее — m. Так как расстояние между противоположными стенками куба равно a, а путь, проходимый молекулой в 1 *сек*, численно равен v, то о каждую стенку молекула ударится $\frac{v}{2a}$ раз в секунду. Считая удары абсолютно упругими, заключаем, что молекула отскочит от стенки со скоростью, равной по величине и противоположной по направлению первоначальной скорости. В результате стенка при каждом ударе приобретает импульс $2mv$, а при $\frac{v}{2a}$ ударах $\frac{mv^2}{a}$. Пусть полное число молекул есть n. Вдоль каждого ребра по нашему предположению

движется $\frac{1}{3}n$ молекул. Поэтому импульс, получаемый каждой стенкой за секунду, численно равный силе, действующей на всю поверхность стенки, равную a^2, есть $\frac{n}{3}\cdot\frac{mv^2}{a} = F$. Давление (т. е. сила, действующая на единицу поверхности стенки) оказывается равным

$$p=\frac{F}{a^2}=\frac{nmv^2}{3a^3}.$$

Так как объем газа есть $V = a^3$, то окончательно получаем:

Основное уравнение кинетической теории $pV=\frac{1}{3}nmv^2$.

Строго говоря, молекулы обладают разными скоростями, и общий импульс следует рассматривать как сумму импульсов, создаваемых отдельными молекулами:

$$F=\frac{1}{3a}[mv_1^2+mv_2^2+\ldots]=\frac{m}{3a}(v_1^2+v_2^2+\ldots).$$

Выше, предполагая, что все молекулы имеют равные скорости, мы получили:

$$F=\frac{nmv^2}{3a}.$$

Следовательно,

$$v^2=\frac{1}{n}(v_1^2+v_2^2+\ldots+v_n^2).$$

v^2 есть *средний квадрат скорости*. Отсюда следует, что *средняя квадратичная скорость*

$$v=\sqrt{\frac{1}{n}(v_1^2+v_2^2+\ldots+v_n^2)}.$$

Средняя же скорость молекул равна

$$\overline{v}=\frac{1}{n}(v_1+v_2+\ldots+v_n).$$

Согласно *Максвеллу* средняя скорость равна 0,92 средней квадратичной скорости

$$\overline{v}=0{,}92v.$$

Так как n молекул массы m имеют общую массу M и находятся в объеме V, то из выражения

$$pV = \frac{1}{3} nmv^2 \quad \text{получаем} \quad v = \sqrt{\frac{3pV}{M}}.$$

По этой формуле можно получить значения средней скорости некоторых молекул при 0° С:

воздуха	447 *м/сек*,
водорода	1692 *м/сек*,
кислорода	425 *м/сек*.

Отношение $\frac{M}{V} = \rho$ есть плотность газа. Следовательно, при заданном давлении и постоянной температуре скорости молекул обратно пропорциональны корням из плотностей газов.

в) Следствия из основного уравнения

Из основного уравнения получаем для давлений при 0° С и t° С: при постоянном объеме

$$p_0 = \frac{Mv_0^2}{3V}; \quad p_t = \frac{Mv^2}{3V}.$$

Подставляя это в уравнение

$$p_t = p_0(1 + \beta t),$$

получаем:

$$\frac{Mv^2}{3V} = \frac{Mv_0^2}{3V}(1 + \beta t); \quad v^2 = v_0^2(1 + \beta t).$$

Абсолютным нулем (—273,16°) называют температуру, при которой средняя кинетическая энергия молекул становится равной нулю [1]).

Абсолютные температуры одинаковых газов пропорциональны квадратам скоростей молекул:

$$T : T_0 = v_t^2 : v_0^2.$$

[1]) Это, конечно, условное понятие, так как при столь низких температурах неприменим основной закон. *(Прим. ред.)*

При постоянной скорости, т. е. постоянной температуре, из основного закона получается закон Бойля—Мариотта

$$pV = \text{const}.$$

Подставляя $v^2 = \frac{Tv_0^2}{T_0}$ в уравнение $p_t = \frac{Mv^2}{3V}$, получаем:

$$\frac{pV}{T} = \frac{1}{3}\,\frac{Mv_0^2}{T_0} = R.$$

Это есть уравнение состояния идеального газа. Постоянная R называется *универсальной газовой постоянной*, если V равно объему одного моля:

$$R = 0{,}848\ \frac{\textit{кпм}}{\textit{град}\cdot\textit{моль}}\,.$$

Вблизи точки конденсации газы перестают подчиняться уравнению состояния идеального газа. Чем плотнее газ и чем чаще происходят соударения молекул, тем заметнее становится, что следует учитывать не объем сосуда, но меньшую величину, так как сами молекулы обладают некоторым объемом.

Кроме того, необходимо при достаточном сжатии газа принимать во внимание силы притяжения, действующие между молекулами.

Соответствующие поправки были внесены *Ван-дер-Ваальсом:*

Уравнение состояния реального газа:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

a и b — постоянные для данного газа величины.

В 1 *см*^{3} газа при нормальных условиях находится

$$N_0 = 2{,}7\cdot 10^{19}\ \text{молекул}.$$

1 моль газа содержит $N = 6{,}02\cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро).

Диаметр молекулы водорода по данным теории газов составляет около $2{,}5\ .\ 10^{-8}$ *см*.

Пути, проходимые молекулами между двумя последующими столкновениями, так называемые пути *свободного*

пробега, составляют при нормальных условиях около 0,00002 *см*, что соответствует длине волны ультрафиолетового излучения.

Масса водородного атома оказывается равной $1{,}67 \times 10^{-24}$ *г*.

2. ЭНЕРГИЯ И МАССА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

а) Принцип Допплера

Принцип Допплера приложим к любому волновому процессу, следовательно и к свету. Подобно тому как высота тона повышается при приближении источника звука, при приближении источника света должно наблюдаться смещение спектральных линий к фиолетовому концу спектра; наоборот, при удалении источника света линии должны смещаться в сторону длинных волн; при земных источниках света удается заметить этот эффект лишь у очень быстро движущихся ионов каналовых лучей и при отражении света от быстровращающегося зеркала. В астрофизике это смещение спектральных линий дает возможность оценивать относительную скорость Земли и небесных светил.

б) Принцип относительности

С точки зрения классической механики при измерении скорости света, распространяющегося вдоль направления движения Земли (скорость Земли $v = 30$ *км/сек* $= 0{,}01\,\%$ скорости света), должны получаться значения, отличные от значений, получаемых при измерении в поперечном направлении. *Майкельсон* (1852—1931) и *Морли* пытались точными измерениями обнаружить это различие. В их опытах луч света падал под углом 45° на стеклянную пластинку и частично проходил насквозь (это направление совпадало с направлением движения Земли), частично же отражался и направлялся перпендикулярно к скорости Земли. Затем оба луча отражались и возвращались на пластинку (рис. 368). Частично пройдя ее, частично отразив-

Рис. 368. Схематическое изображение опыта Майкельсона.

шись от нее, лучи попадали в трубу, где возникала интерференционная картина. Поворот прибора в его плоскости на 90° должен был вызвать изменение интерференционной картины. Несмотря на высокую точность измерений, результат опыта оказался отрицательным.

Классическая физика не могла объяснить с единой точки зрения результаты опыта Майкельсона, допплеровский эффект и явление аберрации света (см. IV. A. 1).

Эйнштейн[1]) попытался преодолеть это затруднение, введя принцип *постоянства скорости света*. По Эйнштейну, скорость света есть наибольшая из известных скоростей. Она не может быть превышена, так как закон сложения скоростей, применяющийся в классической механике, заменяется иным. Поэтому следствия из принципа постоянства скорости света отличаются (при больших скоростях, сравнимых со скоростью света) от следствий классической механики.

Эйнштейн пришел к следующим заключениям.

Пространственные и временные соотношения не являются абсолютными, но зависят от относительного движения наблюдателя и объекта. Масштаб, лежащий в направлении движения, сокращается в отношении

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \qquad \text{(сокращение Лоренца).}$$

Измерение промежутка времени, произведенное движущимся наблюдателем, дает иной результат, чем измерение, произведенное покоящимся наблюдателем. При земных скоростях эти различия ничтожно малы и могут не приниматься во внимание. Так, сокращение диаметра земного шара, расположенного в направлении движения Земли, составляет всего 6,3 *см*.

Поэтому законы классической механики и базирующейся на ней техники сохраняют свое значение, пока скорости малы по сравнению со скоростью света. Большие скорости встречаются только в астрономических наблюдениях и в атомных исследованиях. В обеих этих областях теория относительности подтвердилась так хорошо, что она служит теперь базой всех расчетов при этих исследованиях.

[1]) Альберт Эйнштейн (род. в 1879 г.) профессор физики в Цюрнхе, затем в Берлине; умер в Америке в 1955 г.

в) Следствия из принципа относительности: масса и энергия

Из теории Эйнштейна следует, что масса тела зависит от его скорости, возрастая вместе с ней и делаясь неопределенно большой при скорости, равной скорости света:

Масса $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$; m_0 — так называемая *масса покоя.*

Каждой массе соответствует определенная энергия, определяемая соотношением

$$E = mc^2.$$

Тело, движущееся со скоростью v, обладает поэтому

энергией $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

и

импульсом $mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$.

Фотоны обладают энергией $\varepsilon = h\nu$, следовательно, и им следует приписать массу

$$mc^2 = h\nu; \quad m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

С другой стороны, фотон характеризуется частотой $\nu = \frac{mc^2}{h}$ и импульсом $P = mv = \frac{h\nu}{c}$, так как для фотонов $v = c$.

На основании учения о колебаниях можно написать:

$$c = \nu\lambda \quad и \quad \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}, \quad следовательно, \quad P = \frac{h}{\lambda}.$$

Поэтому, если *свет* будет падать на препятствие, то он *должен оказывать* на него давление [1]).

[1]) Это было экспериментально доказано Лебедевым. (*Прим. ред.*)

3. СТРОЕНИЕ АТОМА

а) Спектральная формула Бальмера

Изучая распределение линий в спектре водорода, *Бальмер* (1825—1898) чисто эмпирически установил спектральную формулу

$$\nu = RZ^2\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Здесь ν — частота, R — *постоянная Ридберга* (названная в честь известного шведского физика), Z — порядковый номер элемента. Числа m и n суть целые, причем $m > n$. Подставляя различные значения m (начиная от $(n+1)$) при заданном значении n, получаем частоты отдельных линий спектральной серии. Постоянная R имеет величину $3{,}29 \cdot 10^{15}$ *сек*$^{-1}$.

б) Модель атома Резерфорда

Английский физик *Резерфорд* (1872—1937), основываясь на своих исследованиях радиоактивных излучений и взаимодействий атомов с α- и β-лучами, пришел к следующим представлениям о строении атома: каждый атом представляет как бы миниатюрную планетную систему. Почти вся масса атома сосредоточена в мельчайшем ядре. Вокруг этого ядра, подобно планетам вокруг Солнца, вращаются электроны. Положительно заряженное ядро водородного атома было названо *протоном*; вокруг него вращается единственный электрон. Ядро атома какого-либо вещества состоит из протонов и нейтронов. *Нейтрон* имеет массу, почти равную массе протона, но является электрически нейтральным. Масса электрона составляет примерно 1/1840 часть массы протона и потому почти не влияет на атомный вес вещества.

Ядро каждого элемента содержит столько протонов, скольким единицам равен его номер в периодической системе. Таким образом, ядро урана содержит 92 протона; им соответствуют 92 внешних электрона. Так как атомный вес урана составляет 238, то в ядре должны находиться еще 238—92 = 146 нейтронов.

Число зарядов ядра определяет место элемента в периодической системе.

По Резерфорду, атом подобен планетной системе, в которой действуют силы электрического притяжения. Радиус траектории электрона в водородном атоме оказывается равным $5{,}3 \cdot 10^{-9}$ *см*, диаметр ядра порядка 10^{-12} *см*, диаметр электрона $3 \cdot 10^{-12}$ *см*. Если увеличить эти величины в триллион (10^{12}) раз, то ядро приобретет радиус 0,5 *см*. Вокруг него, на расстоянии 53 *м*, вращается шарик радиуса 1,5 *см*.

Таким образом, большая часть пространства свободна от вещества:

Масса протона (нейтрона) $= 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ *г*.
Масса электрона $= 1/1840$ протона $= 9{,}11 \cdot 10^{-28}$ *г*.
Заряд электрона = элементарному электрическому заряду = $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона.

в) Модель атома Бора

Модель атома Резерфорда не дает объяснения процессу испускания света атомом. Круговое движение электрона вокруг ядра нельзя считать причиной излучения; в противном случае при излучении энергия системы уменьшалась бы и электрон должен был упасть на ядро. Однако в действительности при излучении атомы остаются неизменными. Для объяснения испускания света *Бор* (род. 1885 г.) высказал гипотезу, подтвержденную впоследствии полным совпадением сделанных теоретических расчетов с экспериментальным материалом.

Согласно Бору, электроны вращаются вокруг ядра лишь по некоторым определенным «квантовым» орбитам. При удалении электрона от ядра его энергия увеличивается, при приближении к ядру — уменьшается. При этом не существует непрерывного перехода от одного состояния к другому, чем модель Бора принципиально отличается от планетной системы. При переходе с одной орбиты на другую

происходит излучение или поглощение одного фотона с энергией

$$\varepsilon = h\nu.$$

Вначале Бор считал орбиты электронов круговыми. Позже *Зоммерфельд* (1868—1951) внес уточнения в теорию, допустив, что электронные орбиты эллиптичны и в одном из фокусов орбиты расположено ядро атома. С этим и некоторыми дополнительными уточнениями *теория Бора* смогла правильно описать закономерности распределения спектральных линий, однако она не давала никаких указаний для вычисления вероятностей перехода электрона с одной орбиты на какую-либо иную, что необходимо для вычисления интенсивности излучения.

г) Атомное ядро и его оболочка

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, оно несет положительный заряд. Обе частицы, входящие в состав ядра, часто обозначают одним термином — нуклон [1]) (ядерная частица), так как было установлено, что нейтроны способны превращаться в протоны, а внутри ядра происходят взаимные превращения этих частиц. Заряд ядра численно равен количеству электронов, окружающих ядро. Диаметр ядра составляет около 0,0001 диаметра атома, вычисленного по данным кинетической теории газов. В этом ничтожно малом ядре сосредоточена почти вся масса атома. Плотность вещества в ядре весьма велика, и в ядре заключается громадная энергия ($E = mc^2$). Вокруг ядра вращаются электроны, они распределены по слоям, причем внутренние электроны сильнее связаны с ядром, чем внешние. Последние легко отрываются от атома при бомбардировке его β-лучами; часть внешних электронов настолько слабо связана с ядром, что отрывается от атома даже при соударениях его с другими атомами (диссоциация). Самые внешние электроны называют также валентными электронами, так как они определяют химические свойства атома.

При исследовании космических лучей и при работе с очень быстрыми частицами, получаемыми в лабораторных условиях, была открыта еще одна элементарная частица —

[1]) Нуклеус (лат.) — ядро.

позитрон. Он имеет массу, равную массе электрона, и обладает единичным положительным зарядом. При взаимодействии излучения высокой энергии (т. е. очень большой частоты) с ядрами появляются две частицы: электрон и позитрон. Через весьма короткий промежуток времени позитрон вступает во взаимодействие с каким-либо электроном, в результате чего обе частицы превращаются в два фотона, соответствующих излучению очень высокой частоты.

д) Искусственная радиоактивность

При попытках разрушить ядро атома, бомбардируя его α-частицами, проявляются весьма мощные силы отталкивания, так как обе частицы имеют положительный заряд. Поэтому α-частица должна иметь большую энергию, достаточную для преодоления «потенциального барьера», т. е. противодействия отталкивающих сил. Когда же для бомбардировки атомных ядер были применены незаряженные нейтроны, надежды на разрушение ядер сильно возросли. Если нейтрон попадает в ядро, оно становится неустойчивым и излучает подобно обычным радиоактивным атомам.

Этот процесс, открытый в 1938 г. известным французским ученым и борцом за мир *Ф. Жолио-Кюри* и его женой *Ирен Жолио-Кюри* (1897—1954), получил название *искусственной радиоактивности*. С радиоактивными процессами связано преобразование атомных ядер. В настоящее время известно уже несколько сотен подобных преобразований; тем самым решена старая проблема превращения одних элементов в другие.

Различают *атомные превращения*, когда неустойчивое ядро испускает легкую частицу (протон, нейтрон, α-частицу), и *деление ядра*, когда тяжелое ядро делится на два примерно равных по массе осколка; одновременно излучается обычно и несколько нейтронов. Эти нейтроны в свою очередь могут вызвать деление новых ядер. Этот процесс нарастает подобно лавине, причем продукты деления приобретают громадную кинетическую энергию (за счет внутриатомной энергии); подобный процесс называется *цепной реакцией*. В США цепная реакция была использована для создания атомной бомбы невиданной разрушительной силы. Позже

там перешли к попыткам, управляя цепной реакцией, использовать получаемую энергию для промышленных целей. В СССР уже в 1954 г. была пущена первая промышленная электростанция, работающая на атомной энергии.

4. ВОЛНЫ ВЕЩЕСТВА

Французский физик *де Бройль* пришел к своеобразному толкованию ограничений, налагаемых теорией Бора на возможные орбиты электронов. Он предположил, что с движущимся электроном связан некоторый волновой процесс и что возможными орбитами являются лишь те, на коих укладывается целое число волн, связанных с электроном (не смешивать их с волнами, излучаемыми атомом при переходе электрона с одной орбиты на другую!).

Бор рассматривал электрон как частицу, занимающую в каждый данный момент определенное положение на своей траектории. Де Бройль связывает с электроном на орбите стоячую волну. Тем самым ставится под сомнение законность представления электрона в атоме как дискретной частицы. Вместо частицы, движущейся по определенной траектории, рассматривается распределенное по всей траектории поле волны. С точки зрения де Бройля всякая движущаяся частица должна обладать волновыми свойствами. В 1927 г. американские физики *Девиссон* и *Джермер*, экспериментируя с быстрыми электронами, то есть частицами вещества, обнаружили дифракционные явления. На рис. 369 изображена дифракционная картина, созданная электронным пучком, прошедшим через металлическую пленку.

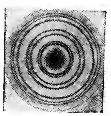


Рис. 369. Дифракция электронов.

> Всякая движущаяся частица вещества обладает волновыми свойствами.

Свет (фотоны) обладает массой и импульсом. Соответственно этому частицы вещества связаны с некоторым вол-

новым процессом. *Волны, связанные с частицами вещества,* имеют

$$\text{скорость распространения } u = \nu\lambda = \frac{\text{энергия}}{\text{импульс}} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v}.$$

Отсюда находим длину волны, связанной с частицей вещества,

$$\lambda = \frac{c^2}{v\nu} = \frac{\varepsilon}{mv\nu} = \frac{h}{mv}, \quad \text{так как} \quad \varepsilon = \nu h.$$

Таким образом, волны и движущиеся частицы не противопоставляются друг другу, но представляют два способа описания одного и того же физического процесса. При исследовании макроскопических тел условия таковы, что на первый план выступают свойства частиц, и движение описывается законами ньютоновской механики с ограничениями, вносимыми теорией относительности.

Волновые свойства частиц вещества становятся заметными лишь у элементарных частиц, обладающих достаточно малой массой и не слишком малыми скоростями (например, у электронов). При этом могут отчетливо наблюдаться, например, дифракционные явления.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

